

位相シフト法を用いた
FA 向け格子投影型三次元計測の高速化

平成 26 年 3 月

和歌山大学大学院システム工学研究科

浅井 大介

Speeding up 3D Measurement with Phase Shifting Grating Projection for Factory Automation

March 2014

Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

Daisuke Asai

概 要

近年、FA(Factory Automation)分野では、ロボットの視覚や検査工程などに三次元計測を用いる場面が増えており、小型・軽量で多点を非接触で高速・高精度に計測可能な装置の開発が求められている。非接触に三次元計測を行う手法の一つとして、格子投影法がある。投影された格子から精度よく高さを求めるための手法として、位相シフト法と全空間テーブル化手法が提案されている。高速化のためには、入力情報である位相シフトされた格子画像を高速に取得する必要がある。そのためには、高速な撮影装置だけでなく、投影格子を高速に位相シフトすることができる機構を持つ格子投影装置が必要である。しかし、従来の格子投影手法による位相シフト機構においては、FA向けとして十分に高速で小型・軽量のものは開発されていない。格子投影装置の位相シフト機構を用いず、1枚の格子画像から位相シフトされた格子画像を生成処理する手法の一つとして、サンプリングモアレ法が提案されているが、この手法は演算処理に時間がかかる。

そこで、本研究では、FA分野で想定される場面に応じた高速な位相シフト機構を持つ格子投影装置と、サンプリングモアレ法をハードウェア化することで高速化した小型・軽量のカメラの開発を行う。

本研究では、3種類の投影装置の開発を行った。一つ目は、温度によって格子ピッチが変化しないように補正方法を提案し、200Hzで位相シフトすることができるレーザー変調格子投影装置の開発を行った。寸法は67mm×65mm×30mmで重さは300gである。位相接続を行うことで、奥行方向に広い範囲で高精度な計測ができる。ビンピッキングの三次元計測に適用を行った。二つ目は、複数ラインLEDデバイスの専用設計を行い、200kHzで位相シフトすることができる複数ラインLED格子投影装置の開発を行った。寸法は55mm×59mm×65mmで重さは240gである。LEDを切替えることで位相シフトすることができるため高速であり、格子の影で格子投影を行うため奥行方向に広い範囲の投影ができる。移動する対象物の計測を行った。三つ目は、新たな投影手法を提案し、600kHzで位相シフトすることができる複数光路格子投影装置の開発を行った。寸法は70mm×70mm×35mmで重さは185gである。面状の光源を用いることが可能なため光量を大きくすることが比較的簡単である。液体など高速に形状が変化する対象物として、5kfpsでミルククラウンの生成の過程を液面の高さ分布の時間変化として計測した。

また、サンプリングモアレ法をハードウェア化することで、100kfpsのリアルタイムで位相解析を行うことができるサンプリングモアレカメラの開発を行った。その寸法は86mm×118mm×44mmで重さは720gである。空間分解能は格子投影装置と比較すると劣るがリアルタイム計測を行うことができる。そのカメラを用いて、定在波を発生させた厚紙の形状の時間変化を434fpsのリアルタイムで計測することができた。

本研究により、FA分野で高速な三次元計測が必要な様々な場面において用いることのできる三次元計測装置の開発を行うことができた。

Abstract

In recent years, 3D measurement is required for Robot Vision and quality inspection in the FA (Factory Automation) field. As a system for these purposes, a small and lightweight system is requested. It is necessary to be able to measure multiple points at high speed and high accuracy without contact. Grating projection method is widely used as a method of a contactless 3D measurement method. Phase shifting method and whole-space tabulation method are used in order to change into height from the projected grating. By using these methods, 3D measurements at multiple points can be performed at high accuracy without contact. In order to speed up, it is necessary to obtain phase-shifted grating images at high speed. For that purpose, not only a high-speed imaging device but also a grating projector having a mechanism capable of phase-shifting grating at high speed is required. However, as the phase-shifting mechanism of the conventional grating projector, a small and lightweight device at a sufficiently high speed has not been developed in the FA field. There is a sampling moire method as the technique for generation processing of phase-shifted grating images from one-shot grating image without using the phase-shift mechanism of the grating projector. However, this method takes time for computation processing.

Therefore, in this study, development of a grating projector having a high speed phase-shift mechanism and high speed camera by hardware implementation of a sampling moire method is performed according to use of the FA field.

This study has developed three types of projectors.

As the first projector, we proposed the compensation method that does not change in the grating pitch with temperature, and developed a MEMS scanner grating projector capable of phase shift by 200 Hz. The dimensions are 67 mm x 65 mm x 30 mm and the weight is 300 g. High-resolution 3D measurement over a wide range in a depth direction becomes possible by performing phase unwrapping. This projector is applied to bin-picking and its effectiveness is confirmed.

As the second projector, a linear LED array grating projector capable of phase shift by 200 kHz has been developed. The dimensions are 55 mm x 59 mm x 65 mm and the weight is 240 g. We developed a LED device that is specially designed. This projector can shift the phase of the projected grating patterns quickly with switching the position of lighted LED. By using this projector, 3D measurement could be performed while a white resin on which letters were engraved was being moved. For example, 3D measurement of objects flowing on a belt conveyor without stopping is enabled.

As the third projector, we proposed a new projected method, and developed a multiple optical path grating projector capable of phase shift by 600 kHz. The dimensions are 70 mm x 70 mm x 35 mm and the weight is 185 g. By using a surface emitting LED, the projector can increase light quantity. 3D measurement of a milk crown was performed at 5 kHz. For example, visualization of shape change of a liquid can be performed.

Moreover, a sampling moire camera with hardware implementation of sampling moire method using FPGA (Field Programmable Gate Array) has been developed. The maximum frame rate is 100 kfps in real time. The dimensions are 86 mm x 118 mm x 44 mm and the weight is 720 g. Although spatial resolution is low, the camera can measure in real time. 3D measurement could be performed at 434 fps in real time on heavy paper on which a standing wave was generated. For example, vibration measurement of multiple points can be performed.

This study has developed a 3D measurement system which can be used under various situations in the FA field where high speed 3D measurement is required.

目次

第 1 章 緒言	1
1-1 はじめに	1
1-2 研究の背景	2
1-3 非接触形状計測手法	4
1-3-1 Depth from Focus	4
1-3-2 Depth from Defocus	5
1-3-3 ステレオ法	5
1-3-4 タイムオブフライト	5
1-3-5 光切断法	5
1-3-6 二次元パターン投影法	6
1-4 位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測	7
1-4-1 位相シフト法を用いた格子投影	7
1-4-2 計測対象物	9
1-4-3 位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測の問題点	10
1-5 研究の目的	11
1-6 本論文の構成	12
 第 2 章 格子投影法による三次元計測の原理	 15
2-1 はじめに	15
2-2 位相解析の原理	16
2-2-1 格子画像の位相解析	16
2-2-2 1 枚の格子画像から位相を求める方法	17
2-2-3 サンプリングモアレ法	18
2-2-4 位相シフト法	21
2-2-5 フーリエ変換位相シフト法	22
2-2-6 位相接続	25
2-3 2 枚の基準面基準面を用いた高さ方向の解析	28
2-4 全空間テーブル化手法	30
2-4-1 Z 方向のテーブル化	30
2-4-2 XY 方向のテーブル化	33
2-4-3 位相から各座標の参照	36

第3章 レーザー変調格子投影装置の開発	37
3-1 はじめに	37
3-2 共振型スキャナについて	39
3-3 レーザー変調格子投影装置	41
3-4 2枚の基準面を用いた三次元計測	44
3-5 ビンピッキングへの適用	47
3-6 複数の基準面を用いた三次元計測	50
3-7 温度による計測誤差の補正	52
3-8 レーザー変調格子投影装置の小型化	57
3-9 おわりに	58
 第4章 複数ラインLED格子投影装置の開発	 59
4-1 はじめに	59
4-2 光源切替位相シフト法	60
4-3 高密度複数ラインLED格子投影装置	63
4-4 平面試料の計測精度	64
4-5 高輝度複数ラインLED格子投影装置	69
4-6 位相シフト機構の応答速度評価	71
4-7 リアルタイム三次元計測	74
4-8 おわりに	76
 第5章 複数光路格子投影装置の開発	 77
5-1 はじめに	77
5-2 複数光路格子投影手法	78
5-3 複数光路格子投影装置	79
5-4 位相シフト機構の応答速度評価	80
5-5 静止物体による精度評価	83
5-6 液面を基準面とした全空間テーブル化手法の精度評価	86
5-7 動的物体の三次元計測	89
5-8 おわりに	95

第6章	サンプリングモアレカメラの開発	97
6-1	はじめに	97
6-2	サンプリングモアレカメラ	98
6-3	サンプリングモアレカメラを用いた三次元計測.....	102
6-4	位相シフト法とサンプリングモアレ法の比較.....	108
6-5	リアルタイム三次元計測	113
6-6	おわりに	116
第7章	従来の投影装置との比較	117
7-1	はじめに	117
7-2	超音波モーター	118
7-3	超音波モーターを用いた格子投影装置.....	119
7-4	DMD を用いた投影装置	123
7-5	おわりに	126
第8章	まとめ	129
8-1	本研究のまとめ	129
8-2	今後の課題と発展	134
	参考文献	135
	研究業績	141
	謝辞	

1. 緒言

1-1 はじめに

本研究では、位相シフト法を用いた FA(Factory Automation)向け格子投影型三次元計測の高速化を行う。位相シフト法を用いた格子投影型三次元形状計測装置の構成は、

- ・ 計測する対象物に格子を投影する格子投影装置
- ・ 格子を投影した対象物を撮影する撮影装置
- ・ 撮影した格子画像の位相解析を行い、高さデータを生成する処理装置

の三つに分けられる。高速化のためには、まず入力情報である位相シフトされた格子画像を高速に取得することができなければならない。そのためは、高速な撮影装置だけでなく、投影格子を高速に位相シフトすることができる機構を持つ格子投影装置が必要である。しかし、従来の格子投影装置の位相シフト機構においては、FA 向けとして十分に高速で小型・軽量のものは開発されていない。格子投影装置の位相シフト機構を用いず、1 枚の格子画像から位相シフトされた格子画像を生成処理する手法として、サンプリングモアレ法がある。しかし、この手法は演算処理に時間がかかる。

そこで、本研究では、FA 分野で想定される場面に応じた、高速な位相シフト機構を持つ格子投影装置の開発と、サンプリングモアレ法をハードウェア化することで高速化した撮影装置の開発を行う。

緒言では、研究の背景と目的、本論文の構成について述べる。1-2 節では、研究の背景として FA 分野における三次元形状計測のニーズについて述べる。1-3 節では、これまでに研究されてきた非接触形状計測手法を紹介する。その後、近年の形状計測で多く用いられている格子の位相解析法である位相解析について述べる。1-4 節では、これまで研究が行われてきた格子投影手法について紹介するとともに、その問題点について述べる。1-5 節では、研究の目的について、1-6 節では本論文の構成について述べる。

1-2 研究の背景

FA においては、部品の供給工程や検査工程、製品の調整工程、設備の立ち上げやメンテナンスなどで、二次元計測の画像処理技術が多く用いられている。近年では、生産技術の発展にともない、三次元計測の画像処理技術を用いる必要性が高まっている。例えば、ネジの供給工程では、箱の中などにランダムにばら積みされているネジの中から、取り出し可能なネジの位置姿勢を認識してネジの取り出しを行う(以下、ビンピッキング)用途がある。検査工程では、樹脂成型品に成型されている浮き出し文字の高さが一定であることを検査する用途がある。このような検査工程は、ベルトコンベア上を停止することなく対象物が流れている場合もある。調整工程では、製品の振動数を調整するような用途がある。例えば、モーターを用いた製品では、歯車同士の隙間の大きさによって振動が起こる場合がある。その振動を抑制するような調整を行うため、リアルタイム計測した振動数をフィードバックすることで歯車同士の隙間の調整を行う用途がある。設備の立ち上げやメンテナンスにおいては、接着剤の塗布装置の塗布する位置や量などのパラメーター調整を行う際に、接着剤を塗布する状況を可視化することで最適な塗布装置のパラメーターを求めたい用途がある。

FA における三次元計測装置の要求仕様は、用途によって異なるが、多くは、対象物にキズをつけないように非接触であることや、設備内の限られたスペースやロボットの先端に取り付け可能なように小型・軽量であることが要求されている。電子部品の組立てなどに用いられるロボットにおいては、可搬能力から寸法は $150\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 以下で重量は 1kg 以下でなければならない。その他の要求仕様として、先に述べた用途を例として以下に述べる。

供給工程におけるビンピッキングの用途では、ロボットとの干渉により対象物を破壊することがないように、精度よく対象物の位置姿勢の推定を行うことができないとしない。そのためには、対象物の三次元情報をカメラの画素単位で取得できるような高い空間分解能が必要である。また、計測精度は、ロボットの位置決め精度の $1/10$ の 0.1mm 程度が要求される。速度においては、ロボットなどが対象物を遮っていない 100ms 程度の間に撮影を行う必要がある。

検査工程における成型された浮き出し文字の深さ検査の用途では、文字の幅は 0.1mm 程度のため高い空間分解能が必要である。また、計測精度は、文字の高さの $1/10$ の 0.01mm 程度が要求される。さらに、ベルトコンベア上を止まることなく移動している対象物の検査もあるため、撮影している間の対象物の移動距離を短くしなければならない。そのため、 1ms 程度で撮影を行わなければならない。

調整工程におけるモーターを用いた製品の振動数を調整する用途では、先に述べた用途ほどの空間分解能は必要ないが、多点の振動の計測を行う場合もある。また、計測精度は、振幅の $1/10$ の 0.1mm 程度が要求される。速度においては、よく製品に用いられるモーターの回転数の倍である $8.3\text{ms} \sim 10\text{ms}(100 \sim 120\text{Hz})$ でリアルタイム計測を行わなければならない。

い.

設備の立ち上げやメンテナンスにおける接着剤の塗布状況を可視化する用途では、接着剤の体積を精度よく計測するために高い空間分解能が必要である。また、計測精度は、接着剤の高さの 1/10 の 0.1mm 程度が要求される。二次元計測では、撮影速度 1kfps 以上の高速度カメラを用いているため、三次元計測においても 1ms より高速に撮影を行わなければならない。

このような用途の FA 分野における三次元計測装置の要求仕様をまとめると、

- ・ 非接触
- ・ 高空間分解能
 - カメラの画素毎の高さ情報
- ・ 高精度
 - 10 μ m～100 μ m 程度
- ・ 高速
 - 1ms～100ms 程度
- ・ 小型・軽量
 - 150mm×100mm×100mm 以下, 1kg 以下

である。

非接触到三次元計測を行う手法の一つとして、格子投影による位相シフト法がある。この手法を用いた製品例として Vialux 社の z-snapper がある。この製品の仕様は、320pixel×240pixel の空間分解能で 10 μ m～120 μ m の精度で計測を行うことが可能であるため、FA 分野における三次元計測装置の空間分解能と精度の要求を満たしている。しかし、22ms 以上の撮影時間がかかるため十分高速ではなく、また、寸法は 200mm×130mm×115mm、重さは 1600g であるため FA 分野で用いることができるように小型・軽量化はなされていない。

そのため、FA 向けに高速化、小型・軽量化された三次元計測装置の開発が必要である。高速化のためには、入力情報である位相シフトされた格子画像を高速に取得する必要がある。それには、高速な撮影装置だけでなく、投影格子を高速に位相シフトすることができる機構を持つ格子投影装置が必要である。しかし、従来の格子投影装置の位相シフト機構においては、十分に高速で小型・軽量のものは開発されていない。また、比較的高速なものにおいても小型で軽量なものがない。

1-3 非接触式形状計測手法

加工技術の向上に伴い、自由曲面を含むものや複雑な形状をした部品が多くなり、高速・高精度に物体の形状を計測したいというニーズがある。そこで、光技術による非接触式の三次元計測手法[1][2]が非常に注目されている。光学的な計測方法には、計測の際になんらかの光パターンを物体に照射しないものと照射するものに大きく分けることができ、それぞれ、受動型(Passive)計測と能動型(Active)計測と呼ばれている[3]。図 1.1 はこれまでに開発されてきた様々な三次元形状計測手法についてまとめたものである。以下に各手法の特徴と利点、及び、欠点について説明する。

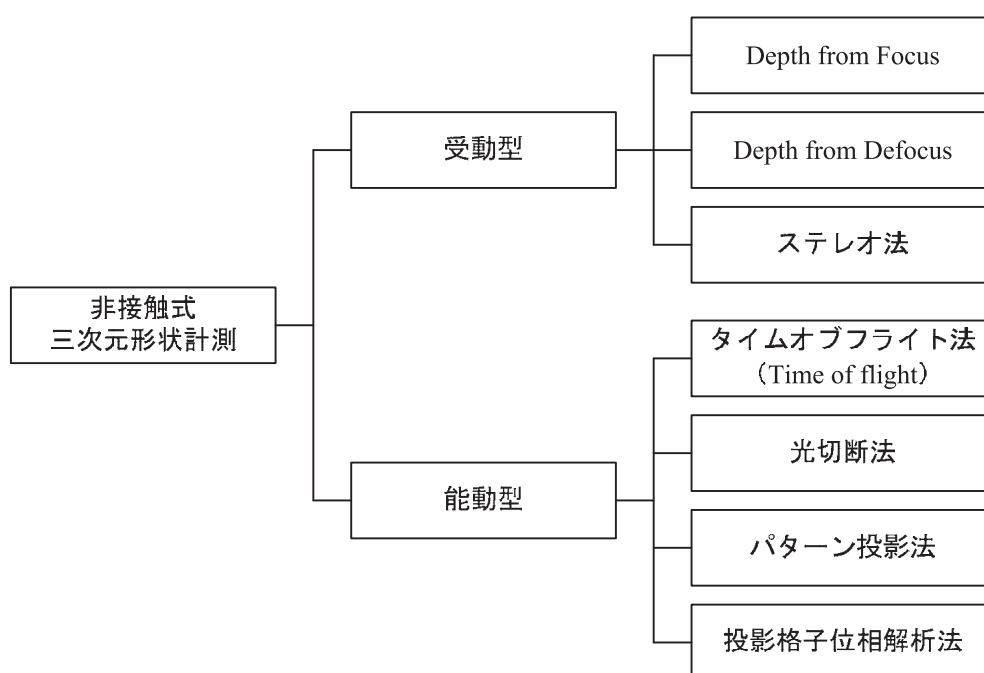


図 1.1 非接触の三次元形状計測手法

1-3-1 Depth from Focus

Depth from Focus 法[4]は、レンズと物体がピントの合う位置にある関係から距離を求める手法である。カメラのフォーカスリングを回して対象物にピントを合わせ、そのレンズの距離目盛を読むことで距離が計測できる。すなわち、画像のぼけの程度を判定する機能と、レンズの繰り出し機構を用意することで、奥行きを計測することができる。石原ら[5]は、レンズの繰り出し機構の高速化を、厚さの異なる複数の平行平面を円盤の円周上にならべ、対物レンズの光軸をその円周上に配置して、円盤を高速に連続回転させる光学的焦点移動機構で実現している。レンズ焦点法は、正確な位置を計測するためにぼけを大きくする必要があり、焦点深度を浅くすることが求められている。そのため、XY 方向の計測範囲を広く取りたい場合は、高開口数で低倍率のレンズが必要になる。

1-3-2 Depth from Defocus

Depth from Defocus 法[6]は、フォーカス調整あるいは絞り調節によって生じるぼけの変化を解析し、距離を推定する手法である。Depth from Focus では多数枚の画像から合焦画像が得られるフォーカス位置を探索する問題であったのに対して、Depth from Defocus ではぼけの生成過程をモデル化し、その逆問題を解くことによって距離情報を求める。ただし、1枚の画像からぼけ量を正しく求めることは困難であるためフォーカス位置の異なる複数枚の画像から相対的にぼけ量を求める手法が多く用いられている。竹村ら[7]は多重フォーカスカメラの開発を行い、高速・高精度な距離計測を実現している。

1-3-3 ステレオ法

ステレオ法[8]とは、ステレオ視の原理に基づく三次元計測である。これは、物体を複数の視点から撮影した多視点画像から、同一の点を撮影したと考えられる対応点を探索し、三角測量の原理に基づいて物体の三次元形状を計測する手法である。対応点を見つけるためには、事前に対象物に複数のターゲットを貼っている方法と、物体の特徴点を抽出する方法がある。この手法の利点として、装置が簡単であることや広い範囲の計測が可能である。測定できる点の数は基本的にターゲットの数に依存する。ステレオ計測において多視点画像を撮影する際、レンズの特性やガンマ値、および、分光感度特性などカメラパラメータの補正や、撮影の同期がカメラ間で必要となる。製品化されているものとしては、Point Gary Research の Stereo Vision Bumblebee2 が挙げられる。

1-3-4 タイムオブフライト

タイムオブフライト(Time of flight)法[9][10]は、光を計測対象物に照射し、その光が物体表面に反射して計測機器に戻るまでの時間から、物体表面までの距離を計測する手法である。この手法では三角測量法に比べ、オクルージョンの発生がない。また広い測定範囲の計測が可能である。製品例としては、MESA Imaging AG の SR4000 がある。しかし、XY 面での計測点が少ない。

1-3-5 光切断法

光切断法[11][12]は、対象物体にレーザースリット光を走査しながら照射し、カメラで撮影した複数枚の画像中のスリット位置から三角測量の原理で形状を計測する手法である。撮影回数によって空間分解能が決まるため、計測に時間がかかる問題がある。製品例として株式会社ミノルタの RANGE7 がある。しかしながら、1回の計測ごとに物体表面をレーザースリット光が走査するための時間を必要とするため、高速化には適さない。また、奥行き方向の計測精度がカメラの画素数によって決定される。この手法の高速化として、レーザースリット光が走査開始から、カメラに受光されるまでの時間を各画素で計測する手法[13][14]が開発されている。しかし、これらは特殊な撮影装置を必要とする。

1-3-6 二次元パターン投影法

二次元パターン投影法とは、空間コード化パターン光投影法[3]とも呼ばれる。二次元パターンを投影することによって、空間を分割してコード化する方法である。コード化された空間内の物体表面を撮影した画像上において、そのパターンの特徴点の位置から、距離または空間座標を求めることができる。投影するパターンには、ドットパターンや複数のコード化されたパターン、格子パターンなどがある。ドットパターンの投影を用いた製品例には、Microsoft Corporation の Kinect がある。この製品は、ランダムなドットパターンを投影している。時間とともに変化した複数枚のパターンを投影する手法の一つとして、空間コード化法がある。それを発展させた手法として、分割した空間の隣接する領域のコード化にハミング距離が 1 であるグレイコードを用いることによって、領域境界で発生するコード化の誤りを少なくするグレイコードパターン[15]が開発され、この手法を用いた形状計測がいくつか報告[16-18]されている。また、高速に処理する装置の開発[19]も行われている。

ドットパターン投影法の場合の特徴点の位置の分解能は基本的に画素単位であるため計測精度はそれほど高くない。また、パターン内で特徴のある部分だけが位置情報を得ることができるので、手法によって情報が得られない画素が存在する場合もある。空間コード化法の場合は、すべての画素でコード化された値を得ることができるが、空間コード化される値が整数値であるために分解能は高くない。しかし、投影格子の位相を解析する手法は、すべての画素において格子の位相が実数値として得られるために精度の高い計測が可能となる。ただし、投影格子のピッチは標本化定理のため 2 画素以上なければならない。次節で投影格子の位相解析手法について詳しく述べる。

1-4 位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測

1-4-1 位相シフト法を用いた格子投影

非接触で空間座標の分布を求めるための方法として、格子投影法がよく用いられる。格子投影法とは、投影装置から物体の投影された格子を異なる角度からカメラで撮影し、物体の形状に応じて変形した格子から物体の形状を求める手法である。投影した格子の輝度分布を正弦波とみなし、その位相を解析する位相シフト法が開発され、広く用いられるようになった。この手法は、任意の画素の位相を求めるのに近傍の画素の情報は不要なため、急激な段差などに影響されず精度のよい三次元計測が実現できる方法として知られている。また、光切断法などと比べて一般に普及しているプロジェクタとデジタルカメラの組み合わせで実現できるため、実用性の高い計測手法であるといえる。本研究では格子投影法と位相シフト法を基本原理として用いている。格子の投影方法には、様々な方法がある。以下に、それぞれの投影方法について説明をする。

(a) 実体格子と移動機構を用いた投影方法

この方法は、フィルムやガラスに描かれた格子を移動機構によって移動させることで、位相シフトされた格子を投影する。投影された格子は、透過率がよく、コントラストが高い。実体格子を自動ステージなど機械的な移動機構で移動させる必要があり、その位置決め精度と速度が、三次元計測の精度と速度に直接影響する。高精度に計測する用途では、位置決め精度が高いピエゾステージと高分解能エンコーダーの組み合わせが多く用いられる。そのため高価である。投影範囲と対象物までの距離を固定した状態で投影された格子のピッチを変えるには、実体格子を入れ替えなければならないため手間がかかることや、移動機構の寿命や投影装置の大きさの問題もある。

(b) 干渉縞を用いた投影方法

干渉縞を用いた投影方法は、ビームスプリッターで二分割したビームを重ね合わせることによって発生された干渉縞を用いる。この投影方法は、AFI(Accordion fringe interferometry)方式[20]と称されている。AFIは、FARO Technologies, Inc. の非接触三次元デジタイザ FARO 3D Imager AMP の格子投影に用いられている。

(c) 液晶を用いた投影方法

液晶を用いた投影方法[21]は、電氣的に格子の位相シフトを行うことや、格子のピッチを変更することが可能である。近年では、デバイスの小型化が進んでおり、携帯用プロジェクタなどに使用されている。格子に特化したストライプ型液晶[22]も開発されている。しかし、温度により液晶の応答速度が変わるため、投影パターンの電氣的な切り替え信号から実際に液晶が動作するまでの時間が変化する問題がある。また、液晶の応答速度は数 ms かかるため高速に位相シフトすることは難しい。

(d) DMD (Digital Micro-mirror Device) を用いた投影方法

DMD は、二次元状に配置されたマイクロミラーの傾きを 2 方向に変化させることで反射した光源の投射方向を制御することにより 2 値の階調の投影を行うデバイスである。マイクロミラーの傾きの制御を PWM(Pulse Width Modulation)で行い、デューティ比を変化させることで濃淡の投影ができる。液晶と比較すると光源をマイクロミラーで反射させるため投影のコントラストが高い。マイクロミラーの傾きの応答速度は最大 32kHz と高速である。このデバイスを用いて高速に形状計測を行った研究[23]もされており、投影格子を 2kHz で位相シフトさせながら撮影した 3 枚の格子画像を用いて 667fps で計測した事例が紹介されている。しかし、マイクロミラーは機械的に駆動しているため高速化には限界がある。また、隣り合うマイクロミラーの間には隙間があるため、光が投射されない部分として投影する格子にノイズとして含まれて、それにより計測精度が低下する問題がある。

(e) 光スキャナを用いた投影方法

光スキャナを用いた投影は、光学系によってライン状にしたレーザーの出力を変調させながら、光スキャナで走査することで格子を投影する方法である。光スキャナは、ガルバノミラーやポリゴンミラー、一次元の共振型スキャナなどがある。この投影方法は、1 走査毎にレーザーの出力の変調タイミングをシフトすることで投影格子の位相をシフトできる。また、格子のピッチはレーザーの出力の変調周波数を変えることで変更できる。この投影方法を投影装置に適用した研究として、ポリゴンミラーを用いた高速な形状計測の研究[24]が行われている。また、光スキャナの中で小型・軽量な一次元の共振型スキャナを用いた形状計測の研究[25]もされており、小型・軽量な計測装置を開発している。これらは、結像レンズを用いていないため、投影深度の深い投影が可能である。

(f) 複数ライン LED を用いた投影方法

この投影方法は、光源切替位相シフト法[26-28]を用いている。複数ライン LED は、ライン状に LED を複数個並べたライン LED を複数ライン配置しているデバイスである。ライン LED のライン方向とガラス格子が平行になるようにガラス格子を複数ライン LED の前方に配置することで、任意の 1 ラインの LED が点灯するとガラス格子の影が投影されるようになる。格子の影を投影しているため、投影深度の深い投影が可能である。また、ライン LED を順次点灯することで位相シフトすることができる。LED とガラス格子のみで投影が可能のため、投影装置の小型化・軽量化が可能である。さらに、LED は点灯消灯が高速にできるため高速に位相シフトすることが可能で、移動機構がないため投影される格子の位置精度は高く、高精度な計測が可能である。この投影方法を用いた三次元計測装置の開発も行われている[29-32]。

(g) 複数光路を用いた投影方法

複数光路を用いた投影装置は、投影レンズの像面側の光路を複数に分割し、それぞれの光路上に格子と LED を配置している。格子は位相を少しずつずらして配置する。この投影手法は、複数ライン LED を用いた投影装置と同じく、LED を順次点灯することで格子の位相をシフトすることができる。また、LED は点灯消灯が高速にできるため高速に位相シフトすることが可能で、移動機構がないため投影される格子の位置精度は高く高精度な計測可能である。さらに、光源に面発光の LED を用いているため、光量の高い投影が可能である。そのため、高速な用途にも用いることができる。

1-4-2 計測対象物

FA 分野の計測対象物の大きさは、半導体の製造検査のような微細なものから自動車の車体など大型のものまで様々である。検査時間も精度も大きさによらず様々であり、用途によっては、計測の手法を変える必要がある。位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測においては 10mm から 1000mm くらいの計測範囲が有効である。本研究では、100mm 程度の計測範囲を対象とする。

1-4-3 位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測の高速化の問題点

位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測の高速化を行うためには、まず入力情報である位相シフトされた格子画像の取得の高速化を行う必要がある。そのためには、撮影装置だけでなく、格子投影装置の投影格子を位相シフトする機構の高速化が必要である。

撮影装置は、画像を高速に撮影する機構の高速化が必要である。FA においては、撮影装置として産業用カメラが用いられる。産業用カメラの撮像素子には CCD(Charge Coupled Device)イメージセンサーや CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)イメージセンサーがある。これらの撮像素子は、画素ごとにメモリーを持たせたり、画素データの読み出し回路を複数設けたりすることで撮影間隔の高速化を実現している。また、産業用カメラのインターフェース規格には、CameraLink や GigE Vision, CoaXPress などがあり、最高 25Gbit/s で画素データの転送が可能である。このように、撮影装置は十分に高速化が行われている。さらに、高画素化や小型・軽量化も行われており、様々な種類の産業用カメラから用途に応じて撮影装置を選択することができる。

投影装置は、投影格子の位相をシフトする機構の高速化が必要である。FA 用として製品化されているものは少なく、製品化されているものにおいては、十分に高速なものはない。また、比較的高速なものにおいても小型・軽量なものはない。他にも、撮影装置との同期が取れないため格子画像の取得に時間がかかったり、投影レンズが交換できないため機器の配置に制限があるため使用することができなかつたりする問題がある。従来の投影装置は、格子がパターンニングされたガラス格子を自動ステージに搭載して移動させる機械的な位相シフト機構が用いられている。しかし、自動ステージの移動に時間がかかるため位相シフトの高速化は困難である。また、液晶や DMD(Digital Micromirror Device)などの画素ごとに投影する光量を制御できるデバイスを用いた投影方法もある。しかし、液晶の応答速度のため格子の位相をシフトさせるためには数 ms かかる。機械的な位相シフト機構と比較すると高速であるが、FA 分野の高速な用途で用いるためには速度が十分でない。DMD を投影装置に用いることにより、高速に形状計測が行われた例が報告[23]がされているが、その装置は小型・軽量でないため FA で用いるには不向きである。

これらの理由により、位相シフトされた格子画像を高速に取得するには投影装置がネックとなっているといえる。

1-5 研究の目的

以上の研究の背景を受けて、本研究では位相シフト法を用いた FA 向け格子投影型三次元計測の高速化のために、位相シフトされた格子画像の取得の高速化を二つのアプローチで行う。一つは、格子投影装置の位相シフト機構の高速化を行う。FA 分野で想定される場面に応じた、高速な位相シフト機構を持つ小型・軽量の格子投影装置の開発を行う。もう一つは、格子投影装置の位相シフト機構を用いず、1 枚の格子画像から位相シフトされた格子画像を生成処理する手法をハードウェア化することで高速化した小型で軽量なカメラの開発を行う。

これらのことを行うことにより、FA 分野の様々な用途において、三次元計測を用いることが可能になり、生産性の向上や製造コスト削減、品質向上がなされる。

1-6 本論文の構成

本論文の流れを図 1.2 に示す。構成は以下の通りである。

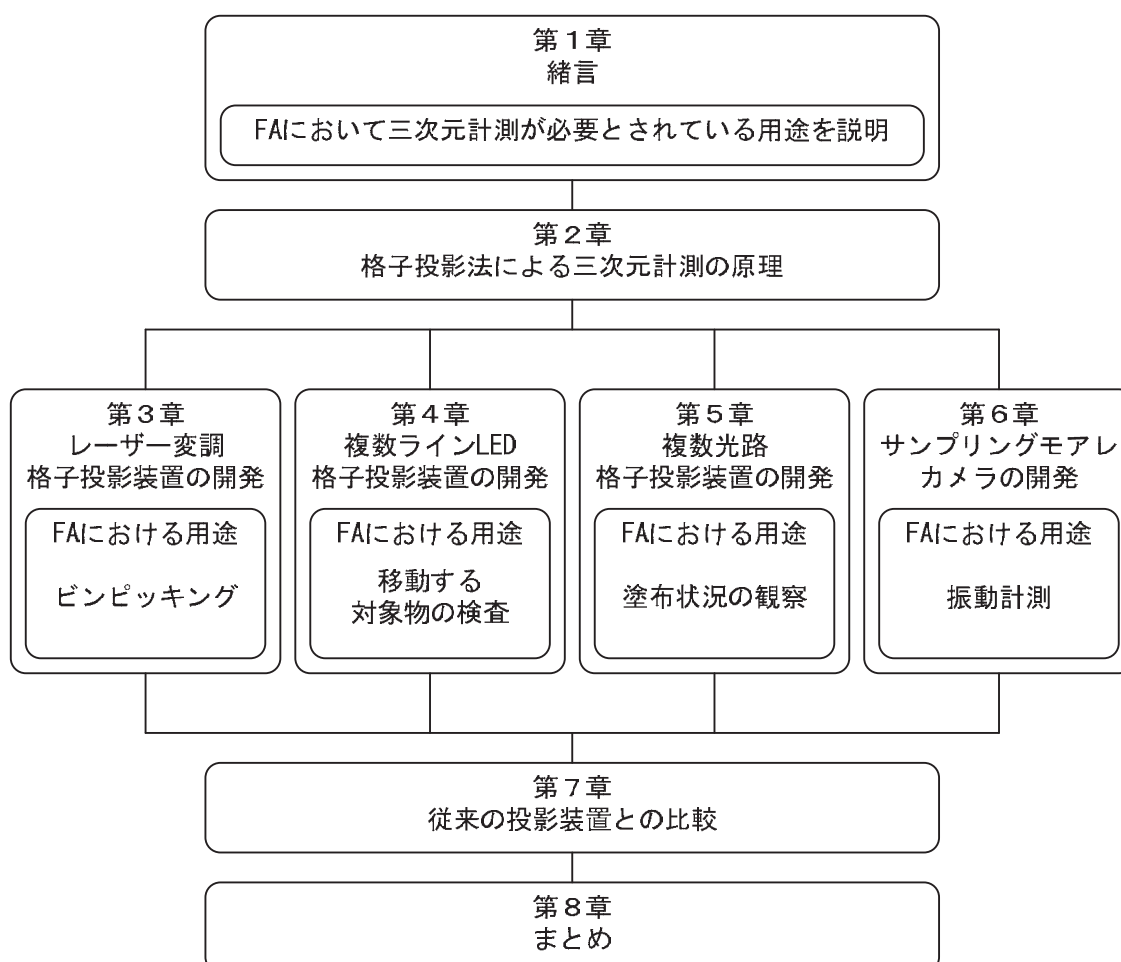


図 1.2 本論文の流れ

第1章「緒言」

本章では、FA 分野における三次元計測の必要性和、歴史的な非接触三次元計測の研究背景について述べる。その後、従来行われてきた研究成果を概観し、三次元計測を FA 分野に用いる際の問題点を明らかにするとともに、本研究の目的を述べる。

第2章「格子投影法による三次元計測の原理」

本章では、フーリエ変換位相シフト法による位相解析、格子投影法を用いた三次元計測の基本原理解、および、位相分布から空間座標を求めるために必要な校正手法として全空間テーブル化手法について述べる。また、空間的編解析法を二次元に拡張したサンプリングモアレ法について述べる。

第3章「レーザー変調格子投影装置の開発」

本章では、ビンピッキングの三次元計測に用いることが可能なレーザー変調格子投影装置の開発を行う。本投影装置は、ラインレーザーの出力を変調しながら一次元の共振型スキャナで走査することにより格子を投影する手法[25]を用いている。この手法は、スキャナの走査周波数で位相シフトができるため、従来のガラス格子を移動させる方式や液晶を用いる方式と比べて高速である。また、光学系による結像を用いていないため投影深度が深い。まず、ビンピッキングに適用するため、高さ方向に広い計測範囲で精度よく三次元計測ができるように、2種類の異なるピッチの格子を投影可能な格子投影装置の開発を行う。また、共振型スキャナの走査角度範囲は温度によって変化するため、格子のピッチが変化する問題がある。そのため、走査角度範囲が変化しても格子のピッチが変化しないように、任意の走査角度においてレーザーの出力が一定になるように補正する手法を提案する。本補正手法の有効性を確認するため、実験装置を用いて走査角度範囲を変化させて実験を行う。さらに、その補正手法を用いた小型・軽量の格子投影装置の開発を行う。

第4章「複数ラインLED格子投影装置の開発」

本章では、移動する対象物の検査工程の三次元計測に用いることが可能な複数ラインLED格子投影装置の開発を行う。本投影装置は、光源に複数のLEDを用いて、それをスイッチングすることにより高速に格子の位相シフトを行うことができる光源切替位相シフト法[26-28]を用いている。本手法は、ガラス格子の影で格子投影を行うため奥行方向に広い範囲の投影ができる。先行研究では、本手法の原理を確認する実験を行ったが、光量が足りないため精度よく解析するには至らなかった。そのため、実用化に向けて専用設計した複数ラインLEDデバイスの開発を行う。また、それを用いた投影装置の開発を行い、性能の評価を行う。本投影装置を用いた三次元計測装置を構築して、対象物を移動させながら三次元計測を行う。その結果から、本投影装置の有効性を確認する。

第5章「複数光路格子投影装置の開発」

本章では、塗布剤などの塗布状況の観察の三次元計測に用いることが可能な複数光路格子投影装置の開発を行う。光源切替位相シフト法と同じく光源に複数のLEDを用いて、それをスイッチングすることで高速に格子の位相シフトを行うことができる投影手法を新たに提案する。この投影方法は、面発光のLEDを用いているため、比較的簡単に光量を上げることが可能である。本手法を用いて開発した格子投影装置と高速度カメラを組み合わせることで三次元計測装置を構築し、動的物体の計測を行う。液体など形状変化の高速な対象物の計測を行うことで、生産設備の立ち上げやメンテナンスで必要とされている接着剤などの塗布状況を可視化する用途に適用できるか高速性の検証をする。

第 6 章「サンプリングモアレカメラの開発」

本章では、振動している対象物の三次元計測をリアルタイムで行うことが可能なサンプリングモアレカメラの開発を行う。格子投影装置の位相シフト機構を使用せず、静止した 1 枚の格子画像から位相シフトされた格子画像を生成する手法として、サンプリングモアレ法[33-35]がある。位相シフト機構が不要なため格子投影装置がネックでなくなる。しかし、サンプリングモアレ法は演算量が多いため、高い演算能力を持つ処理装置が必要である。そのため、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いてサンプリングモアレ法を処理することができるサンプリングモアレカメラの開発[36]が行われている。しかし、FA 向けとしては十分に高速で小型・軽量ではない。そのため、FA 分野で用いることができるように、さらに高速化された小型・軽量のサンプリングモアレカメラの開発を行う。本カメラを用いて振動している対象物の三次元計測をリアルタイムで行う。その結果から、振動計測をリアルタイムで行いたい用途に適用できるか検証を行う。

第 7 章「従来の投影装置との比較」

本章では、従来手法を用いた投影装置と前章で述べた投影装置の位相シフト機構の速度について比較を行う。従来手法を用いた投影装置は、FA における小型・軽量の要求を満たしている装置を選択する。従来手法の投影手法は、一般的に多く用いられている機械的な位相シフト機構と画素による電気的な位相シフト機構をもつ 2 種類の投影手法を選択した。FA 分野における小型・軽量の要求を満たしている機械的な位相シフト機構をもつ投影装置は、開発されていないため、超音波モーターを用いて小型・軽量化した格子投影装置を開発する。画素による電気的な位相シフト機構をもつ投影装置には、市販されている評価用の DMD を用いた投影装置を使用した。これらの投影装置を用いて、性能を評価する。そのうえで、従来の投影装置と本研究で開発した投影装置の比較を行う。

第 8 章「まとめ」

本章では、本研究の成果を統括した後、今後の課題・展望について議論する。

2. 格子投影法による三次元形状計測の原理

2-1 はじめに

非接触で空間座標の分布を求めるための方法として、格子投影法[37][38]が良く用いられる。格子投影法は、プロジェクタから物体に投影された格子を異なる角度からカメラで撮影し、物体の形状に応じて変形した格子から物体の形状を求める手法である。

空間座標を求めるために、従来の手法[39][40]では光学系パラメータとしてカメラとプロジェクタのレンズ中心位置と光軸の向きなどが用いられてきた。しかし、これらの手法はレンズ収差がないという仮定の上で成り立っている。従来は計測精度がそれほど高くなかったのでその影響は無視できたが、位相解析手法が進歩して、高精度な位相解析が可能となり計測精度が向上すると、相対的にレンズ収差による影響が大きくなり無視できなくなってきた。収差によるゆがみの影響を低減する方法として、補正式を用いて画像を補正する方法が研究[41-45]されている。しかし、完全にレンズ収差による影響を取り除くことはできない。

藤垣ら[46-48]は、カメラおよびプロジェクタのレンズの中心位置と光軸の向きなどの光学系パラメータを求めずに、計測物体近傍に設置した基準平面から得られる情報だけを座標系に用いることによって、レンズ収差による影響を受けない計測法を開発した。レンズの中心を用いる従来の手法と比較して精度よく計測することができる。さらに、この手法を発展させた全空間テーブル化手法[49]の提案がなされている。

本章では、まず 2-2 節で位相解析に関する基礎原理について述べる。次に、2-3 節で 2 枚の基準面を用いた高さ方向の解析手法を述べたうえで、2-4 節で全空間テーブル化手法の原理について述べる。

2-2 位相解析の原理

格子投影法では、物体の表面上に正弦波状の輝度分布を持つ格子を投影する．これを異なる方向からカメラによって撮影する．撮影された格子画像は物体の形状に応じて変形するため、この変形具合を精度よく解析できれば、その三次元形状を精度よく得ることができる．この格子の変形を解析するために位相解析を用いる．本節では位相解析の基礎原理について述べる．

2-2-1 格子画像の位相解析

画像内で格子の位置を求める手法としては、格子の中心線を抽出し、その線上の各点の座標を求める手法が初期の手法であった．1本1本の格子には順番に整数の格子番号がつけられているとすると、このようにして求めた点列の座標上にその格子番号が対応しているという結果が得られる．しかし、この方法では、格子の位置を画素単位でしか求めることができず、格子線と格子線の間の部分は測定データが得られないという致命的な短所がある．補完することによって、格子の位置をサブピクセル分解能で求める手法もあるが、基本的には精度の悪い解析しか行うことはできない．

近年になって、投影した格子の輝度分布を正弦波と見なし、その位相を求める手法が開発された．位相は格子番号に 2π をかけた値である．これにより、小数の格子番号が表現できることになる．図 2.1 に格子番号と位相の関係を示す．図 2.1 では、(a)に示す輝度分布を持つ格子の位相分布は(b)のようになる．このように位相を求めることによって、画像内の各点における格子番号を実数値として求めることができ、精度のよい解析が行えるようになる．ただし、投影格子のピッチは標本化定理のため 2 画素以上なければならない．

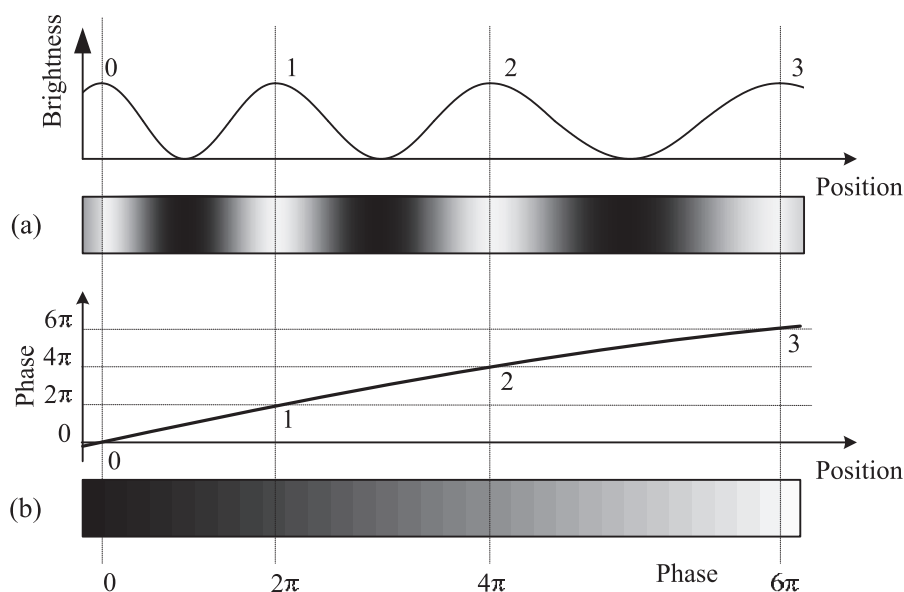


図 2.1 格子番号と位相の関係： (a)格子の輝度； (b) 格子の位相分布

位相解析手法としてはいくつかの手法が開発されている。各目的に対して、最も適した手法を用いることで良好な測定結果を得ることができる。まず、2-2-2 項では、1 枚の格子画像から格子の位相を解析する手法について述べる。次に、2-2-3 項では、二次元の格子画像の位相解析を行うことが可能なサンプリングモアレ法について述べる。さらに、2-2-4 項および 2-2-5 項では、位相シフトされた複数の格子画像から位相を求める位相シフト法について述べる。位相解析によって得られる位相分布は、格子 1 本ごとに 0 から 2π の位相の繰り返しとして得られる。本来の位相は位相接続と呼ばれる処理を行うことによって得ることができる。位相接続については 2-2-6 項で述べる。

2-2-2 1 枚の格子画像から位相を求める方法

1 枚の格子画像から格子の位相を求める方法としてフーリエ変換を用いる方法がある。格子画像をフーリエ変換し、得られたスペクトルから一次調和波を抽出し、逆変換することで、実部と虚部の位相が $\pi/2$ ずれた複素格子が得られる。その逆正接を計算することで、各点の位相を求めることができる。またフーリエ変換した後のスペクトルの一次調和波の成分のみを抽出し、原点方向への格子のピッチに相当する分だけ移動させて、それを逆フーリエ変換することによって、格子の変形を表すモアレ縞を簡単に得ることができる。武田らはこの手法を Fourier Transform Profilometry(FTP) [39]と呼んでいる。

フーリエ変換法は 1 枚の格子画像から位相を解析できる有効な手法ではあるが、格子のピッチが大きく変化するような場合には、一次調和波と高次の調和波が重なり、一次調和波の抽出が正確にできなくなる。そこで、ガボール関数を窓関数にすることによってピッチの変化を小さくし、一次調和波を精度よく分離する手法が考えられている。この手法はガボール変換格子法[50]と呼ばれている。この手法は、一次調和波の分離精度はよいが、計算時間が長くなる。

このほか、フーリエ変換を用いずに 1 枚の格子画像から位相解析を行う手法として、ウェーブレット変換格子法が開発されている。格子画像に対してウェーブレット変換を行うことにより、各画素の周波数ごとの周波数スペクトルを得ることができる。これにより、画素ごとの一次調和波を抽出することが可能となり、格子ピッチが急変するような場合でも位相解析が可能になる。しかし、この手法も計算時間がかかるという欠点がある。

2-2-3 サンプリングモアレ法

1 枚の画像に 2 成分の位相を混ぜる方法として、二次元格子を用いる手法がある。二次元格子の位相解析を行う手法として、サンプリングモアレ法[33-35]がある。これは、1 枚の格子画像からサンプリングする位置を変化させることで位相シフトされたモアレ画像を生成して、そこから位相を求める空間的縞解析法[51]を二次元に拡張したものである。以下に、原理を説明する。

まず、空間的縞解析法の手順を図 2.2 に示す。図 2.2 (a)のような格子模様をカメラで撮影すると、図 2.2 (b)に示すよう格子画像が得られる。それに対して、格子の画素数に近い整数の画素数 N で起点を変えながら x 方向にサンプリング(間引き処理)を行う。ここでは $N=4$ とする。そうすると、図 2.2 (c)のように 4 画素おきにデータを持った 4 つの画像を得ることができる。これは、それぞれ左から 1 番目、2 番目、3 番目、4 番目の画素から 4 画素ごとに間引いている。このように、1 画素ずつサンプリング点を変えることは、位相で考えると $\pi/2$ シフトさせた状態になるので、位相シフト法に相当する。しかし、サンプリングした間の画素の輝度値のデータはないため、輝度値のデータがない画素に各サンプリング点の輝度値を補間する。そうすると、図 2.2 (d)のような 4 枚の位相シフトされたモアレ画像が生成される。位相シフトされたモアレ画像は近似的に余弦波の輝度分布をもっているとみなすと、モアレ縞の輝度値 $I(x, y, n)$ は、式 (2.1) から (2.4) のように表される。($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$)

$$I(x, y, 0) = a(x, y) \cos\left(\theta(x, y) + \frac{2\pi \times 0}{N}\right) + b(x, y) \quad (2.1)$$

$$I(x, y, 1) = a(x, y) \cos\left(\theta(x, y) + \frac{2\pi \times 1}{N}\right) + b(x, y) \quad (2.2)$$

$$I(x, y, 2) = a(x, y) \cos\left(\theta(x, y) + \frac{2\pi \times 2}{N}\right) + b(x, y) \quad (2.3)$$

⋮

$$I(x, y, n) = a(x, y) \cos\left(\theta(x, y) + \frac{2\pi \times n}{N}\right) + b(x, y) \quad (2.4)$$

ここで、点 (x, y) はモアレ画像内の 1 点で、 $a(x, y)$ と $b(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ は、それぞれ輝度振幅と背景輝度、 $n=0$ におけるモアレ縞の位相を表す。 $I_L(x, y)$ と $I_H(x, y)$ をそれぞれ輝度の最大値と最小値とすると、 $a(x, y)$ と $b(x, y)$ は、式 (2.5) で表される。

$$a(x, y) = \frac{I_H(x, y) - I_L(x, y)}{2}, \quad b(x, y) = \frac{I_H(x, y) + I_L(x, y)}{2} \quad (2.5)$$

得られた 4 枚のモアレ画像から次項から述べる位相シフト法を適用すると, 図 2.2 (e) のモアレ縞の位相分布画像が得られる.

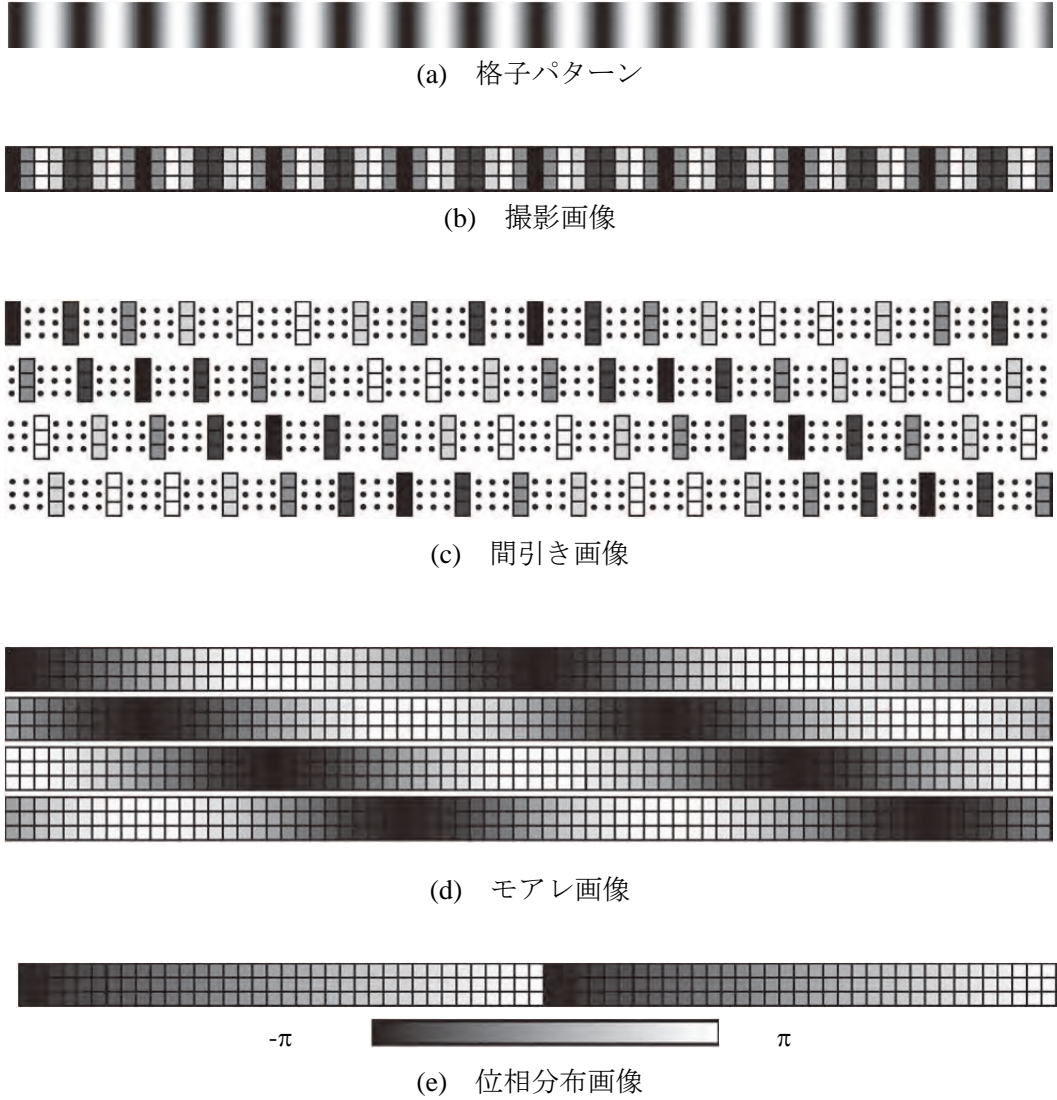
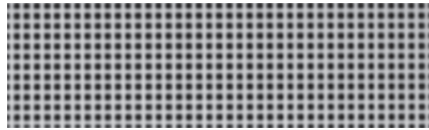


図 2.2 空間的縞解析法を用いた位相算出

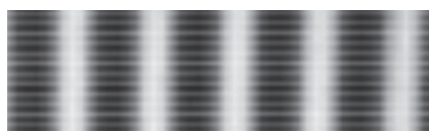
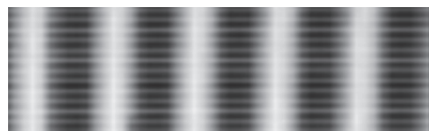
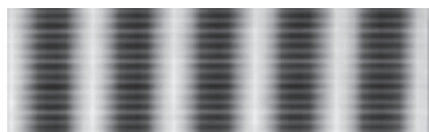
次に, サンプルングモアレ法を用いて二次元格子の位相解析を行う手順を図 2.3 に示す. 図 2.3(a) に撮影された二次元格子画像を示す. 図 2.3(a) に対して, y 方向に平滑化を行うことで, 二次元格子の y 方向成分が減り, 図 2.3(b) に示すような x 方向の格子画像が得られる. それに対して, 空間的縞解析法を適用することで, 図 2.3(c) に示す位相シフトされた N 枚のモアレ画像が得られる. 各画素は N 回の位相シフトをした値を持つため, 次項から述べる位相シフト法を適用すると, 図 2.3(d) のモアレ縞の x 方向の位相分布が得られる. 同様に y 方向のモアレ縞の位相分布は, x 方向に平滑化を行い, 次に y 方向にサンプルングを行い, 位相シフトされたモアレ画像を得て, それらを用いて位相解析を行えばよい.



(a) 二次元格子画像



(b) x 方向の格子画像



(c) モアレ画像



$-\pi$  π

(d) 位相分布画像

図 2.3 サンプルングモアレ法を用いた位相算出

2-2-4 位相シフト法

位相シフト法とは、格子の位相を 1 周期の範囲でシフトさせながら、複数枚の格子画像を撮影し、得られた複数枚の画像から位相分布を求める方法である。すべての画素において輝度が 1 周期分変化するため、その輝度変化から各点ごとに独立して位相を求めることができる。つまり、周囲の画素の輝度変化を用いることなく位相解析することができる。そのため、段差や不連続のある物体の形状計測に有効な手法といえる。

位相シフト回数 N としたとき、 N 枚の位相シフトされた格子画像の輝度値 $I(x, y, n)$ は、式 (2.6) で表すことができる。 ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$)

$$I(x, y, n) = a(x, y) \cos\left(\theta(x, y) + n \frac{2\pi}{N}\right) + b(x, y) \quad (2.6)$$

点 (x, y) は格子画像内の 1 点で、 $a(x, y)$ は輝度振幅、 $b(x, y)$ は背景輝度をあらわし、 $\theta(x, y)$ は $n=0$ の格子の位相をあらわす。 $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ の 3 の未知数を求めればよいので、最少 3 の位相シフトされた画像を撮影すればよい。3 の場合は、式 (2.7) に示すように解析すれば、位相を求めることができる。

$$\tan \theta(x, y) = \frac{\sqrt{3}(I(x, y, 2) - I(x, y, 1))}{2I(x, y, 0) - I(x, y, 1) - I(x, y, 2)} \quad (2.7)$$

位相シフト法では、位相を $\pi/2$ ずつシフトさせた 4 つの輝度値から位相を求める 4 ステップの手法 [52] が最もよく用いられている。式 (2.8) に示すように簡単な計算式で位相を求めることができる。さらに枚数を増やして、de Groot による 5 ステップ [53] や Hariharan による 6 ステップ [54]、7 ステップ [55] の位相シフト法も提案されている。枚数が多いほどノイズに対する誤差の影響を受けにくくなるが、撮影時間が増えるという問題点が生じる。

$$\tan \theta(x, y) = \frac{I(x, y, 3) - I(x, y, 1)}{I(x, y, 0) - I(x, y, 2)} \quad (2.8)$$

位相シフト法では、よく正弦波もしくは余弦波の輝度分布を持つ格子を用いることが多いが、白黒のバイナリ矩形格子を連続的に位相シフトさせ、時間積分することで位相分布を求める積分型位相シフト法 [56][57] も提案されている。正弦波の格子の作製が困難な場合に有効な手法である。

2-2-5 フーリエ変換位相シフト法

Bruning ら[58]は干渉縞の位相解析を行うためにフーリエ変換を用いる方法を開発している．これは複数枚の位相シフト格子画像を1周期分撮影し，位相シフト方向にフーリエ変換し，周波数1の成分からその点の位相を求める手法である．この手法はフーリエ変換により基本周波数以外のノイズ成分を除去することができるため，高精度に位相を得ることができる．武田はこの手法をフリンジ走査法[59]と呼んでいる．森本らはこの手法をフーリエ変換位相シフト法[60]と呼んでいる．

フーリエ変換位相シフト法の原理について説明をする．

位相シフト量 $\alpha = 2\pi/N$ とすると式(2.6)は，式(2.9)で表される．

$$I(x, y, n) = a(x, y)\cos(\theta(x, y) + n\alpha) + b(x, y) \quad (2.9)$$

少しずつ位相シフトしながら画像を撮影し，それらの画像を奥行き方向に重ねることで，図 2.4(a)に示すような三次元画像を得ることができる． x 方向の1ラインにおける輝度分布の模式図を図 2.4(b)に示す．

式(2.9)を複素数表示で表すと，式(2.10)のようになる．

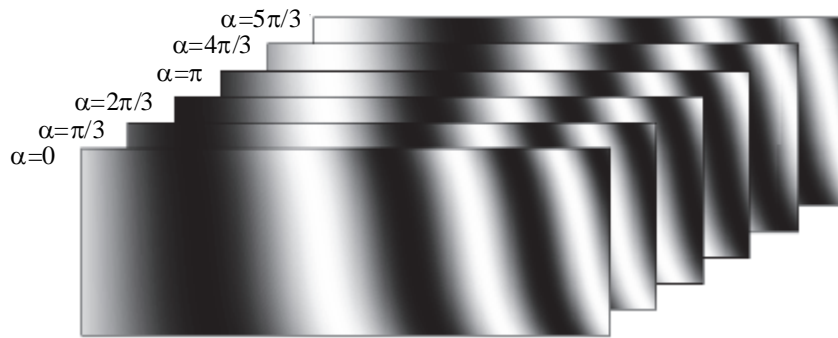
$$I(x, y, n) = \frac{a(x, y)}{2} \exp(j(\theta(x, y) + n\alpha)) + \frac{a(x, y)}{2} \exp(-j(\theta(x, y) + n\alpha)) + b(x, y) \quad (2.10)$$

式(2.10)をフーリエ変換すると式(2.11)に示すようなスペクトルが得られ，それぞれのフーリエスペクトルの大きさは式(2.12)のようになる．

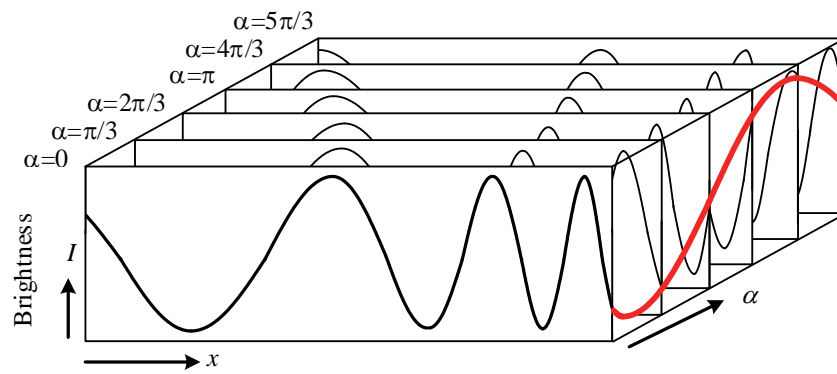
$$F(x, y, \omega) = \sum_{n=0}^{N-1} I(x, y, n) \exp(-jn\alpha\omega) \quad (2.11)$$

$$|F(x, y, \omega)| = \left(\text{Re}(F(x, y, \omega))^2 + \text{Im}(F(x, y, \omega))^2 \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

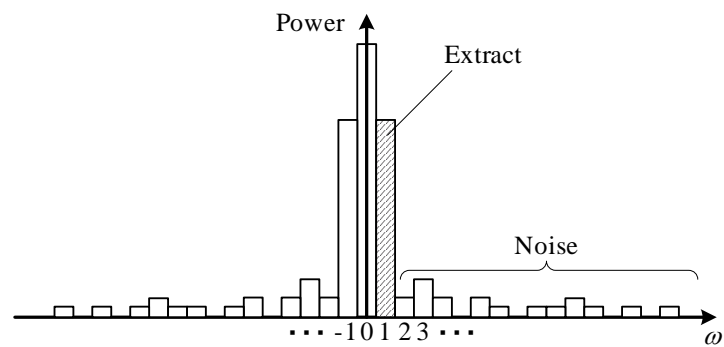
ここで， ω は周波数であり， N は得られるスペクトルの数を表す．式(2.11)からは，理想の正弦波であれば， $\omega = -1, 0, +1$ だけの値を持つが，測定時のノイズやプロジェクタの輝度非線形性などにより他の周波数成分も現れる．図 2.4(c)に示すような周波数1のスペクトルのみを抽出し，虚部と実部の比の逆正接を計算すると，きわめて精度よくその画素における位相を求めることができる．式(2.12)から周波数1の成分だけ抽出すると式(2.13)のようになる．



(a) 位相シフト毎の格子画像を重ね合わせた三次元画像



(b) (a)の x 方向の輝度分布



(c) 任意の点でのフーリエスペクトル



(d) 位相分布

図 2.4 フーリエ変換を用いた位相シフト法の原理

$$F(x, y, 1) = \sum_{n=0}^{N-1} f(x, y, n) \exp(-jn\alpha) = \frac{N}{2} a(x, y) \exp(j\theta(x, y)) \quad (2.13)$$

したがって、位相 θ は、 $F(x, y, 1)$ の実部と虚部の値から式(2.14)のように求めることができる。

$$\tan \theta(x, y) = \frac{\text{Im}(F(x, y, 1))}{\text{Re}(F(x, y, 1))} \quad (2.14)$$

以上の計算を全画素について同様に行うことによって、全画素における位相分布を得ることができる。図2.4(a)に示す位相シフト毎の格子画像を重ね合わせた三次元画像に対して、この操作を行った結果より得られた位相分布を図2.4(d)に示す。

2-2-6 位相接続

前項で述べた位相解析では、得られた位相は $0 \sim 2\pi$ または $-\pi \sim \pi$ の繰り返しとして得られる。このような位相を位相接続前の位相分布またはラップされた位相(wrapped phase)と呼ぶ。また本来位相からラップされた位相を得る処理を位相のラッピング(phase wrapping)という。

格子や干渉縞にその位相が 2π 進むごとに 1 ずつ増えていくような番号を付ける。このように付けられた番号を格子番号または縞次数と呼ぶ。図 2.5 に格子番号と位相接続後の位相の関係を示す。

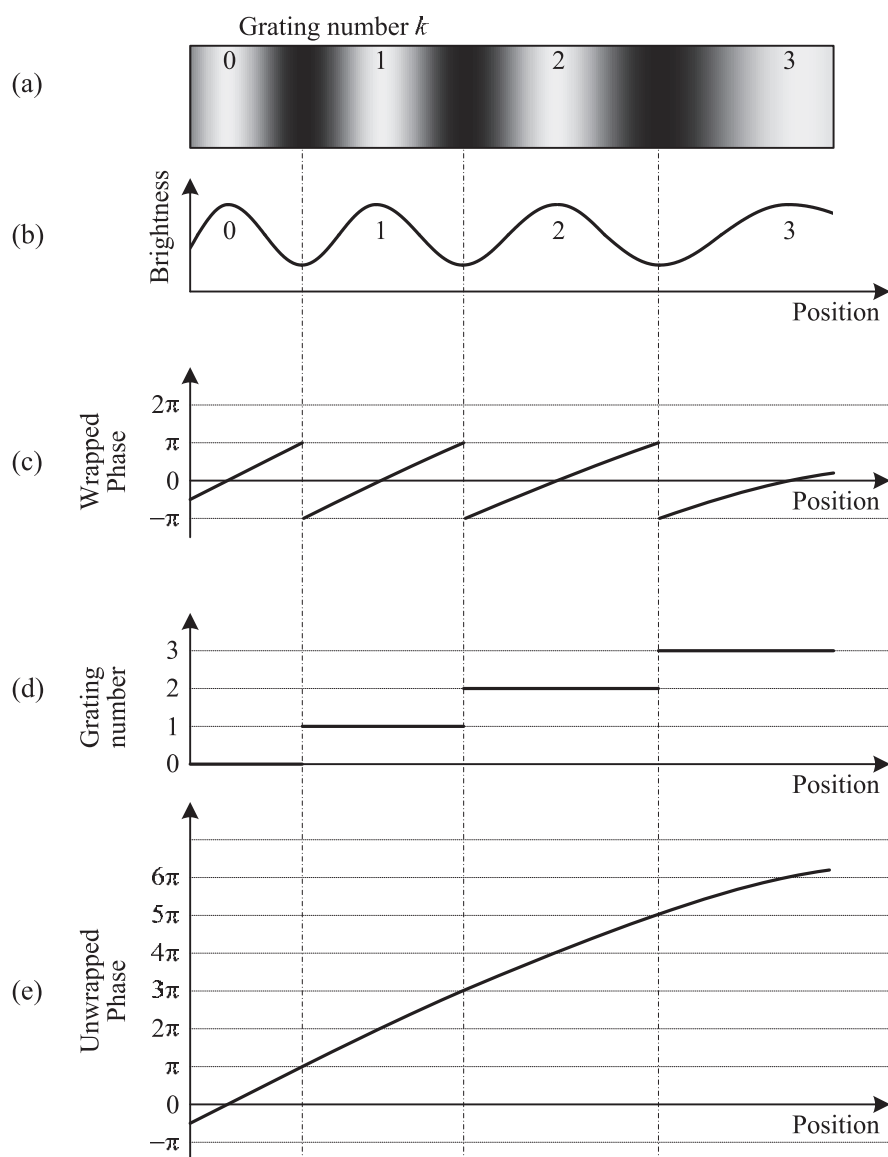


図 2.5 格子番号 k と位相接続後の位相 ϕ との関係

- (a) 格子画像 ; (b) 輝度分布 ; (c) ラップされた位相 θ ;
(d) 格子番号 k ; (e) 位相接続された位相 ϕ

図 2.5(a)に正弦波状の輝度分布を持つ格子画像を示し、その輝度分布を図 2.5(b)に示す。図 2.5(a)では、左端の輝度の高い部分を格子番号 0 とし、右に一本分進むごとに 1 ずつ増やされた格子番号が付けられている。図 2.5(c)に、位相の範囲が $-\pi$ から π の位相接続前の位相 θ の分布を示す。図 2.5(d)に格子番号の分布を示す。格子番号 k は整数値をとり、連続している位相の範囲では同一の値を持つ。位相接続前の位相 θ と格子番号 k から式 (2.15) の計算を行った結果として得られた値 ϕ の分布を図 2.5(e)に示す。図 2.5(e)は、図 2.5(c)における不連続のない位相分布となっている。

$$\phi(x, y) = \theta(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (2.15)$$

このように、位相解析によって得られた位相に対して格子番号の 2π 倍を加えることにより本来の位相を得ることができる。このような位相を位相接続後の位相またはアンラップ (unwrap) された位相と呼ぶ。この処理を位相接続またはアンラッピング (phase unwrapping) という。

位相接続を行う手法としては、近傍の画素の位相から位相接続後の位相を空間的に求める空間的位相接続法と、時間的に求める時間的位相接続がある。さらに同一画素における複数の位相情報から位相接続後の位相を求める異なるピッチの格子を用いる方法もある。以下にそれぞれの手法について説明する。

(a) 空間的位相接続法 (Spatial phase unwrapping)

空間的位相接続法において最も簡単な手法として、隣の画素の位相と比較してその差が π より小さくなるように $2\pi N$ (N は整数) を加えるというものである。

この手法のアルゴリズムは単純であるが、非常にノイズに弱い手法である。例えば、ある一点にノイズがあれば、それ以降に位相接続を行う点はすべて間違った位相となる。また、不連続な領域の位相接続を行うことができない。

Huntley らの研究[61]によって詳しく述べられている。ノイズの影響を少なくするため、領域分けを行う手法[62][63]などが考えられており、それぞれ適用範囲を限れば有効な手法である。ただし、手法によって位相接続を行うスタート点から空間的に位相接続を行うため、時間がかかるという欠点もある。しかし、最近の研究によれば、リアルタイムで空間的位相接続が行える手法[64]も提案されている。

(b) 時間的位相接続法 (Temporal phase unwrapping)

時間的位相接続法とは、格子のピッチを時間とともに増加させていき、各画素における位相の時間変化からその点の位相接続後の位相を求める手法であり、Huntley[65][66]らによって提案されており、この手法を不連続物体の形状計測や干渉縞解析に適用[67]している。

(c) 異なるピッチの格子を用いる手法

同一画素における複数個の位相情報から位相接続後の位相を求める異なるピッチの格子を用いる手法では、2種類の異なるピッチの格子の位相をそれぞれ求めておき、そこから縞次数を求める手法である。画素ごとに位相接続を行うため、不連続な物体でも正しく位相接続を行うことができる。

格内と岩田[68]らは、液晶プロジェクタを用いて投影する格子のピッチを2通りに変えることで、段差のある物体の形状計測を行っている。Gushov ら[69]も複数ピッチの位相アルゴリズムを構築し、干渉縞解析に用いている。

2-3 2枚の基準面を用いた高さ方向の解析

図 2.6 に示す光学系を用いて位相と高さの関係を説明する． x - y 平面を基準面と平行にとり，計測物体の高さ方向を z 軸とする．カメラと投影装置は $z = H_c$ と $z = H_p$ の位置にそれぞれ固定してあり，投影装置からは基準面上でピッチ p となる等間隔の格子が投影されている． $z = 0$ の基準面を R_0 とし，そこから z 方向に距離 z_1 だけ移動させた基準面を R_1 とする．計測物体上の任意の点 $P(x, y, z)$ とカメラの同一画素に撮影される R_0, R_1 上の点をそれぞれ点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ，点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ とすると次式が得られる．

$$z_1 : h = x_1 - x_0 : x - x_0 \quad (2.16)$$

これを h について整理すると次式が得られる．

$$h = z_1 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (2.17)$$

点 P, P_0 と P_1 の位相 ϕ, ϕ_0 と ϕ_1 を先に述べた位相解析手法と位相接続を用いてそれぞれ求めると次式が得られる．

$$\begin{cases} x_1 = \frac{H_p - z_1}{H_p} \left(\frac{\phi_1 - \phi_0}{2\pi} (p + x_0) \right) \\ x = \frac{H_p - h}{H_p} \left(\frac{\phi - \phi_0}{2\pi} (p + x_0) \right) \end{cases} \quad (2.18)$$

これは， H_p が z_1 と h に比べて十分大きいときに次式のようになる．

$$\begin{cases} x_1 \approx \frac{\phi_1 - \phi_0}{2\pi} (p + x_0) \\ x \approx \frac{\phi - \phi_0}{2\pi} (p + x_0) \end{cases} \quad (2.19)$$

この式と式(2.17)から次式が得られる．

$$h \approx z_1 \frac{\phi - \phi_0}{\phi_1 - \phi_0} \quad (2.20)$$

したがって，カメラで撮影される各画素についてあらかじめ 2 枚の基準面を撮影して位

相分布を得ておけば，計測対象を撮影して位相分布を求めれば，計測対象の高さ（ z 座標）分布を求めることができる．

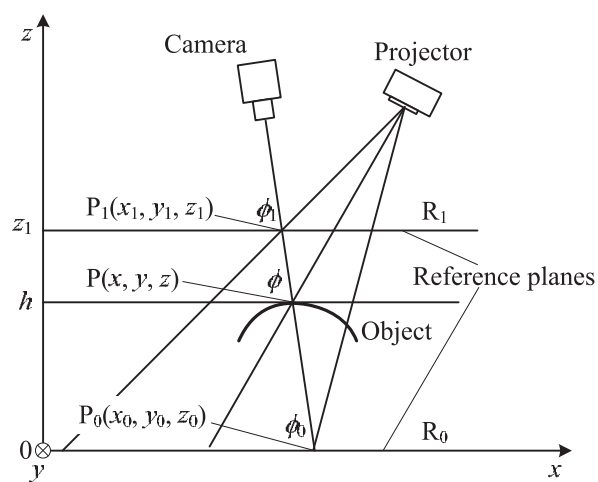


図 2.6 位相と高さの関係

2-4 全空間テーブル化手法

全空間テーブル化手法は、 z 軸に垂直に設置された基準面を z 軸方向に少しずつ平行移動させながら、それぞれの位置において投影格子の位相分布を求めることをキャリブレーション作業として行い、得られた複数の位相分布から位相と三次元座標の対応テーブルを 1 画素ごとに作成する手法である。レンズの中心を用いる従来の手法と比較して精度よく計測することができる。以下に原理を説明する。

2-4-1 z 方向のテーブル化

図2.7(a)で示すように、基準面にプロジェクタを用いて格子を投影し、これをカメラで撮影する。その後、格子の位相を変化させながら、1周期分の格子画像を撮影する。こうして得られた1周期分の格子画像に位相シフト法を適用することで、基準面の高さ z_0 における位相分布を求める。次に図2.7(b)のように基準面の位置を Δz ずつ移動させながら、それぞれの z における基準面の位相分布を求めていく。この時、基準面の高さを低いほうから z_i ($i=0, 1, 2, \dots, n-1$)とする。ここで、 n は基準面を動かした回数である。なお、図中の投影格子は輝度値の高い部分実線で、輝度値の低い部分を点線で示している。

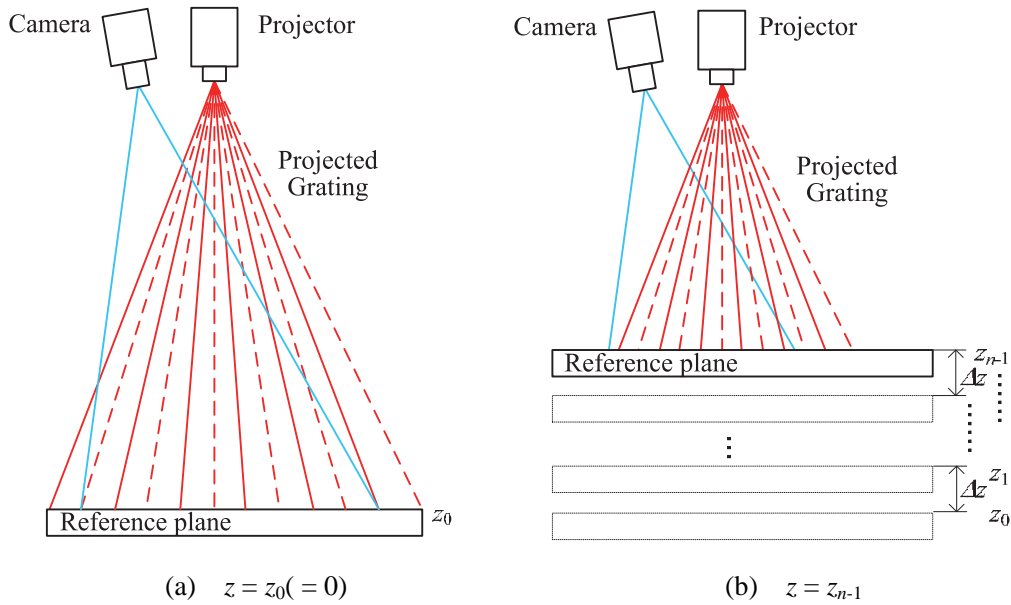


図 2.7 z 方向の基準面撮影図

ここまでの作業で、カメラの1画素ごとに各 z 座標における位相を求めることができた。カメラの任意の1画素における z 座標と位相 ϕ の関係を図2.8に示す。これを用いて全ての画素における位相と高さのテーブルを作成する。なおテーブルの作成には、図2.8中の0から k までの要素を用いる。ここで k は、0番目の要素の位相を最初に上回る要素である。

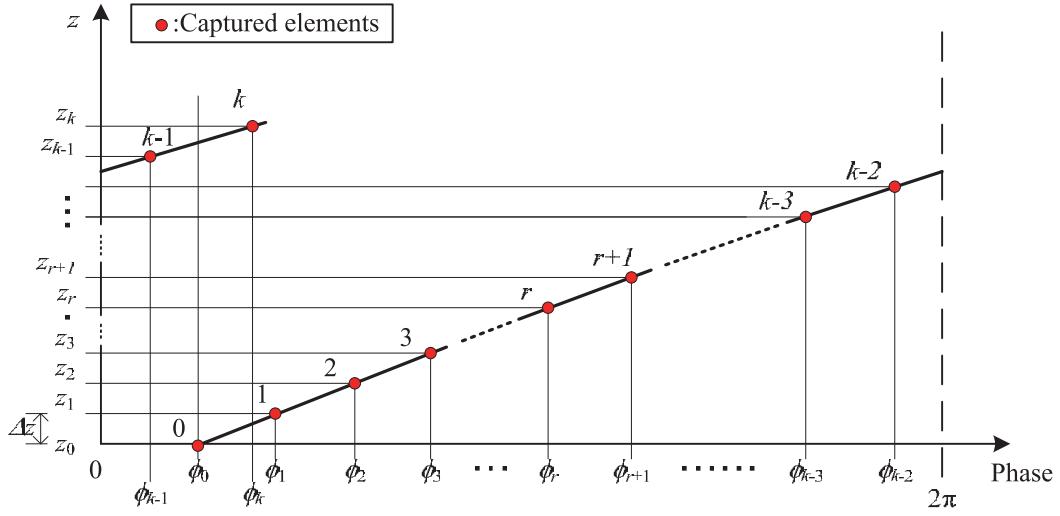


図2.8 基準面撮影で得た位相と高さの関係

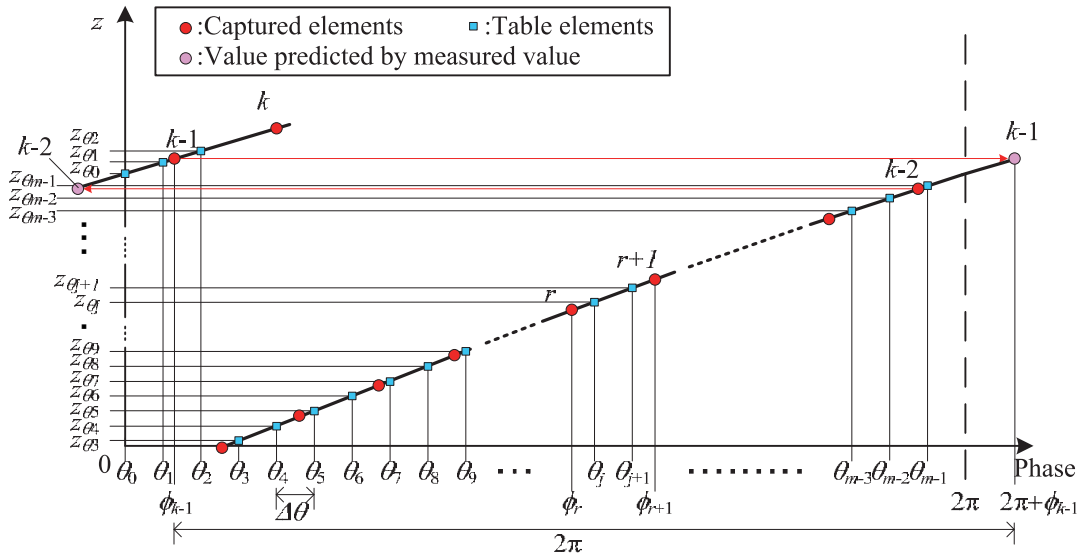


図2.9 テーブル要素の作成図

求めたカメラの任意の1画素における z 座標と位相 ϕ の関係から、位相から z 座標への変換テーブル作成の概要を図2.9に示す。作成するテーブルの要素は、隣の要素との間隔 $\Delta\theta$ を一定に保つようにする。要素には位相の小さいほうから0, 1, 2, ..., j ..., $m-1$ と番号をつけ、それぞれの位相は θ_i ($i = 0, 1, 2, \dots, m-1$)とおき、対応する高さを z_{θ_i} とする。ここで、 m は作成するテーブルの要素の総数である。 m と $\Delta\theta$ との間には、以下の関係がある。

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{m} \quad (2.21)$$

j 番目の要素の高さ z_{θ_j} は、式(2.22)に示すように図2.9中の θ_j に隣り合う撮影で得られた要素の位相 ϕ_r と ϕ_{r+1} を用いて直線近似によって求める．図2.9中の θ_{m-1} のように位相が切れているところでは、撮影で得られた要素が両端に無い．この場合は、撮影で得られた要素の中で0に最も近い位相 ϕ_{k-1} に 2π を加えることで、仮の撮影要素を作成し、この仮の要素を使いテーブル要素の高さを求める．

$$z_{\theta_j} = \frac{\Delta z}{\phi_{r+1} - \phi_r} (\theta_j - \phi_r) + z_r \quad (2.22)$$

作成したある画素での位相と高さの関係テーブルを図2.10に示す．ここで、基準面の位相を求めた時と同様にして、計測対象の位相 θ を求める．式(2.23)に示すように θ を $\Delta\theta$ で割った商 s は θ が参照すべきテーブル要素の番号と一致するため、その画素における z 座標 z_{θ_s} が求まる．これを全画素に対して行えば、計測対象の高さ分布が算出できる．

$$s = \frac{\theta}{\Delta\theta} \quad (2.23)$$

この手法では、あらかじめ求めておいた基準面の位相を元に高さ分布を算出する．これにより、投影格子が正弦波にならないことによる計算誤差や、カメラレンズの歪曲収差の影響による誤差を回避できる．さらにテーブル参照を行うため画素ごとの高さの計算が不要で、その参照も除法を1度行うだけですむため、解析に要する時間を大幅に短縮することができる．

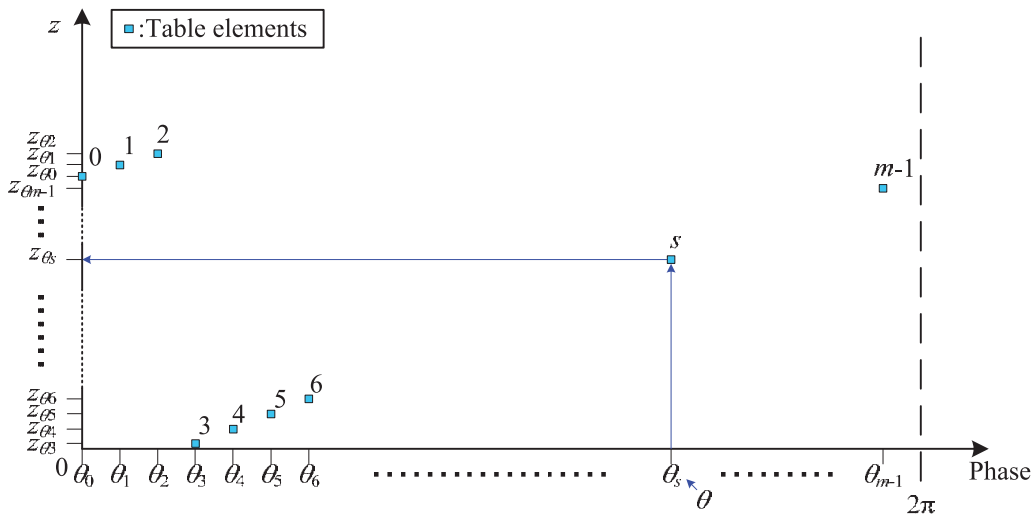


図 2.10 作成した位相と高さの関係テーブルとその参照

2-4-2 XY方向のテーブル化

x 方向の基準面撮影の様子を図 2.11(a)に示す．この時プロジェクタからは何も投影しないか光源を切っておく．液晶パネル表面を基準面として格子画像を表示し，これをカメラで撮影する．その後，表示する格子の位相を液晶パネル上で一定間隔ずつずらしながら順に撮影する．これを表示格子の 1 周期分繰り返し，位相シフト画像を得る．これらの画像に位相シフト法を適用して位相分布を求める．また，カメラに撮影されている範囲と表示を行っている範囲の対応をとることができれば，位相の接続が可能となり，表示格子の位相 ψ と x 座標に一对一の対応付けができる．すなわち，表示格子の位相がわかれば任意の点における x 座標は位相 ψ ，格子 1 周期分の長さ p を式(2.24)に当てはめることで算出できる．次に，図 2.11(b)のように基準面の位置を Δz ずつ動かし，それぞれの位置での x 座標を画素ごとに求めていく．

$$x = \frac{\psi}{2\pi} p \quad (2.24)$$

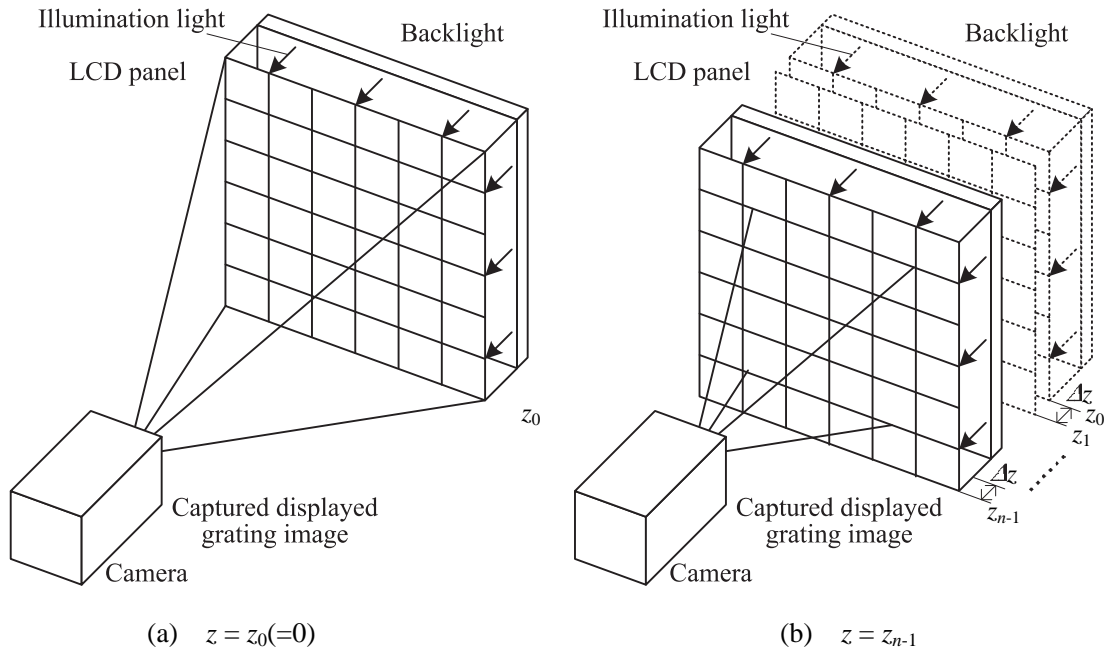


図 2.11 x 方向の基準面撮影図

以上の作業で，カメラの 1 画素ごとに z 座標と x 座標の関係を得ることができる．これを図 2.12 に示す．この関係と図 2.10 の関係を用いて，位相と x 座標のテーブルを作成する．

テーブル作成の概要を図 2.13 に示す．ここで m はテーブル要素の数で，2-4-1 項の m と等しい．作成するテーブル要素の高さには，図 2.9 のテーブル要素の高さ $z_{\theta i}$ を用いる． j 番目のテーブルの要素の x 座標 $x_{\theta j}$ は，式(2.25)に示すように図 2.12 中の高さ z_j に隣り合う

撮影で得られた要素の x 座標 x_t と x_{t+1} を用いて直線近似によって求める。

$$x_{\theta j} = \frac{x_{t+1} - x_t}{\Delta z} (z_{\theta j} - z_t) + x_t \quad (2.25)$$

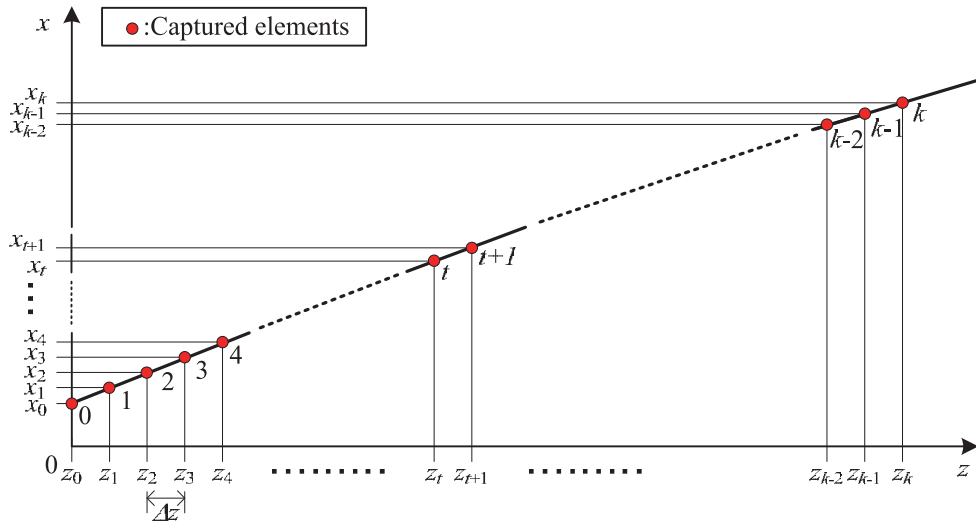


図 2.12 基準面撮影で得た位相と x 座標の関係

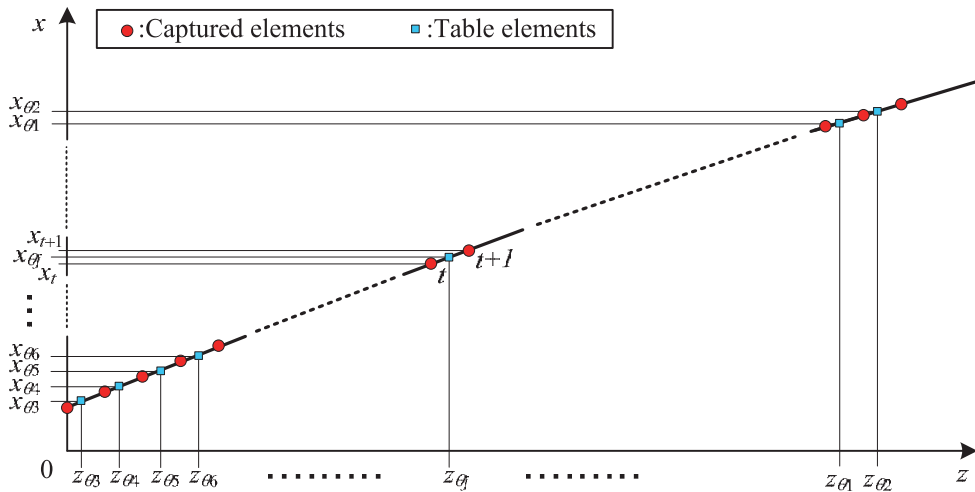


図 2.13 テーブル要素の作成図

ある画素の位相と x 座標の作成した関係テーブルを図 2.14 に示す。2-4-1 項のテーブル参照の時と同様に、計測対象の位相 θ を求め、それを $\Delta\theta$ で割った商を求めれば、 x 座標が算出できる。

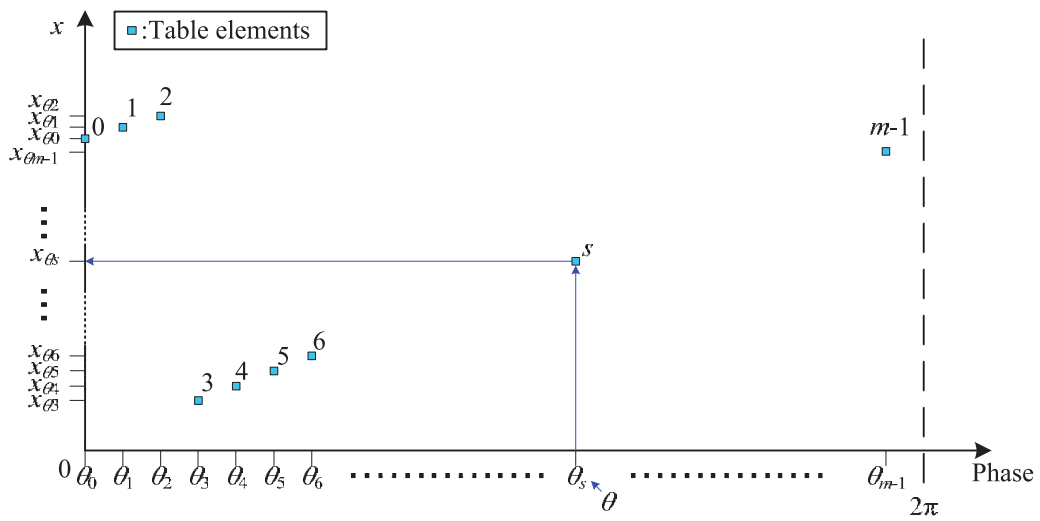


図 2.14 作成した位相と x 座標の関係テーブルとその参照

x 座標のテーブル作成の際，高さ と x 座標の関係から，格子の位相と x 座標の関係への変換を行っているため， x 座標の算出に z 座標の算出が不要になる．また計測結果の濃淡表示などが目的で詳しい解析を行わないのであれば，さらに高速な結果の表示が可能となる．

y 座標についても同様の手法で位相から y 座標を求めるテーブルを作成することができる．

2-4-3 位相から各座標の参照

2-4-1 項と 2-4-2 項において、位相 θ から座標 z 、位相 θ から座標 x 、もしくは座標 y への変換テーブルの作成と参照法について述べてきた。ここで位相 θ から x 、 y 、 z 座標への変換について実際に使用している方法を述べる。

図 2.15 に作成したある画素における m 個のテーブル要素数を持つ位相 θ から x, y, z への変換テーブルの概念図を示す。図中の Index number は式(2.23)で求めた商 s の値である。これらはすべて画素単位でメモリ上に配列としてそれぞれの並び順のまま保持され、参照の際には n 番目の場所に保管されているデータを読みだしてすることで結果を導出している。

Phase θ	Index number	Coordinate x	Coordinate y	Coordinate z
$(2\pi/m) \times 0$	0	x_0	y_0	z_0
$(2\pi/m) \times 1$	1	x_1	y_1	z_1
$(2\pi/m) \times 2$	2	x_2	y_2	z_2
$(2\pi/m) \times 3$	3	x_3	y_3	z_3
$(2\pi/m) \times 4$	4	x_4	y_4	z_4
⋮				
$(2\pi/m) \times (m-1)$	$m-1$	x_{m-1}	y_{m-1}	z_{m-1}

図 2.15 位相から座標への変換テーブルの概念図

3. レーザー変調格子投影装置の開発

3-1 はじめに

位相シフト法による格子投影型三次元計測を用いることが要求されている用途の一つに、箱の中などに三次元的にランダムに積まれている複数の対象物の中から、取り出し可能な対象物の位置姿勢を推定して、産業用ロボットなどで取り出しを行うビンピッキングがある。この三次元計測装置は、限られたスペースやロボットの先端に取り付けすることができるよう、小型・軽量でなければならない。また、対象物は高さ方向に積まれているため、高さ方向の計測範囲が広くなければならない。そのため、投影深度が深い格子投影を行う必要がある。さらに、ロボット先端に三次元計測装置を取り付けた場合は、格子画像を撮影している間ロボットを停止させなければならない。その停止時間は、直接生産性に影響を与えるため、高速に格子画像の取得を行う必要がある。そのためには、高速な位相シフト機構を持つ小型・軽量の投影装置が必要である。

そのような要求を満たす、投影手法としてラインレーザーの出力を変調しながら一次元の共振型スキャナで走査することにより格子を投影する手法[25]がある。本論文では、この投影手法を用いた投影装置をレーザー変調格子投影装置と呼ぶ。この投影手法は、スキャナによってラインレーザーを走査し、スキャナの走査周波数に同期してラインレーザーの光強度をコントロールする信号を正弦波状に変化させることで格子を投影する。その信号の位相をシフトすることで格子の位相をシフトすることができるため、スキャナの走査周波数毎に位相シフトすることができる。そのため高速な格子の位相シフトが可能な手法である。また、光学系による結像を格子投影に用いていないため投影深度が深い。しかし、位相シフト法によって得られた位相分布は $-\pi$ から π の繰り返しとなり、格子 1 本ごとに不連続になる。そのため、深さの広い格子投影が可能な特徴を活かせていない。また、全投影領域で投影された格子のピッチは一定でない。なぜなら、共振型スキャナは揺動運動しているので走査速度が正弦波状に変化するからである。さらに、共振型スキャナは温度や気圧などによって固有振動数が変化するため、一定の走査周波数で駆動させている場合、走査角度範囲が変化する。そのため、格子のピッチが変化する問題がある。

本章では、ビンピッキングの三次元計測に用いることが可能なレーザー変調格子投影装置の開発を行い、本投影装置を用いた三次元計測装置と産業用ロボットを組み合わせたシステムを構築して、ビンピッキングに適用する。その結果から、本投影装置の有効性の確認を行う。3-2 節では、共振型スキャナについて、3-3 節では、共振型スキャナとラインレーザーを用いたレーザー変調格子投影装置の構成と特徴について述べる。3-4 節では、平面試料を計測した結果について述べる。3-5 節では、深さの広い格子投影が可能な特徴を活用できるように位相接続による計測範囲の拡大を行う。その手法を用いて、ビンピッキングへ適用することで本手法の有効性の確認する。3-6 節では、格子のピッチが一定でなくても精度のよい計測を行えるように、全空間テーブル化手法をキャリブレーションに適用した

結果を述べる．3-7 節では，温度によって格子ピッチが変化する問題に対して，格子ピッチが変化しないように補正する手法について提案を行う．また，実験装置を用いて本補正手法の有効性の確認を行う．さらに，本補正手法を組み込んだ小型・軽量化された投影装置の開発を行う．3-8 節では，本章のまとめを記す．

3-2 共振型スキャナについて

共振型スキャナは、共振により 1 枚のミラーの傾きを変えることで光を走査するデバイスである。近年では、半導体の製造技術を利用した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) スキャナがある。MEMS スキャナは、ミラーにコイルが配線されており、機械式のものと比較して回転部の重量が軽いため、高い共振周波数と広い走査角度を実現している。ポリゴンミラーやガルバノミラーなどと比較して、小型、高速、超寿命、省電力、低騒音の特徴を持っている。また、電磁方式、静電方式、圧電方式など様々な駆動方式で実用化がされている。三次元形状計測で使用する場合、広範囲に投影したいのでミラーの振れ角度が広くミラーサイズが大きいものが良い。そのため本研究では電磁方式を用いる。

電磁方式の MEMS スキャナの構造の模式図を図 3.1 に示す。トーションバーを回転軸として可動板の表面に駆動コイルとミラーを形成している。マグネットは筐体に取り付けられている。機械式の共振型スキャナは、可動板にマグネットが配置されて筐体にコイルが取り付けられている。動作原理の説明をする。マグネットによる磁界のため、駆動コイルに電流を流すとローレンツ力が発生する。これによってトーションバーを回転軸として可動板が傾く。このときトーションバーのねじれによる復元力が発生するのでローレンツ力とつり合いの位置まで傾く。このとき、スキャナの固有周波数で電流を流すと共振により小さな電流でミラーを大きく傾けることができる。本研究では、一次元 MEMS スキャナとして日本信号社製 ECO SCAN : ESS112 と ESS115、機械式の共振スキャナとしてベンチャーフォーラム三重製 MMD_01 を用いた。表 3.1 と図 3.2 にそれぞれ仕様と写真を示す。

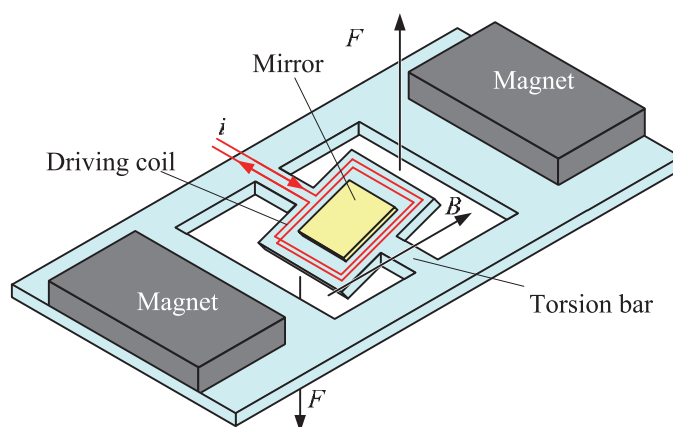
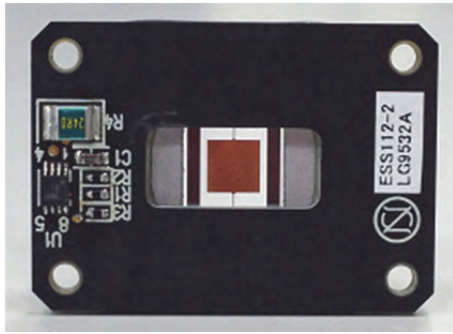
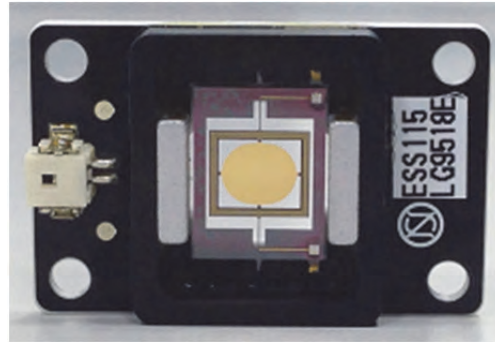


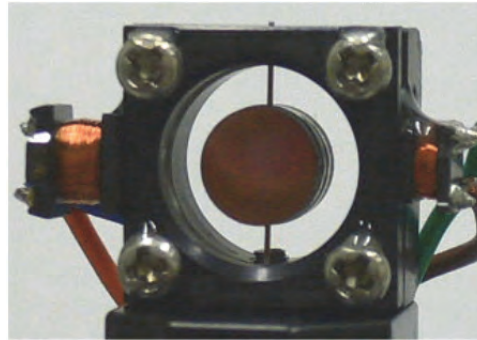
図 3.1 電磁方式の MEMS スキャナの構造の模式図



(a) ECO SCAN : ESS112
(日本信号社製)



(c) ECO SCAN : ESS115
(日本信号社製)



(c) MMD_01
(ベンチャーフォーラム三重社製)

図 3.2 共振型スキャナ

表 3.1 スキャナの仕様

	ESS112	ESS115	MMD_01
走査速度	2175Hz \pm 5%	565Hz \pm 7%	200Hz \pm 10%
ミラーサイズ	4mm \times 4mm	4.5mm \times 5.5mm	ϕ 6mm
走査光学角度	\pm 20degree	\pm 30degree	\pm 20degree
外形寸法	30mm \times 21.5mm \times 4.6mm	37mm \times 24mm \times 5.6mm	14mm \times 14mm \times 9mm

3-3 レーザー変調格子投影装置

共振型スキャナの中には二次元のスキャンニングも可能なものがあり、これと半導体レーザーをスポットレーザーにした組合せでも格子を投影することができる。この組合せの場合、複雑なパターンが投影可能である。しかし、走査に時間がかかることや、制御系が複雑になるためコストアップするなどのデメリットが挙げられる。正弦波状の格子の投影の場合は1方向の輝度変化ができればよいので、先に述べた一次元のMEMSスキャナとラインレーザーの組合せを用いて投影装置を試作した。

本研究で試作したレーザー変調格子投影装置のブロック図を図3.3に示す。光源には半導体レーザーを用い、光学系によりx軸方向のラインレーザーにしている。それを先に述べた一次元のMEMSスキャナでy軸方向に走査することにより二次元に投影を行う。

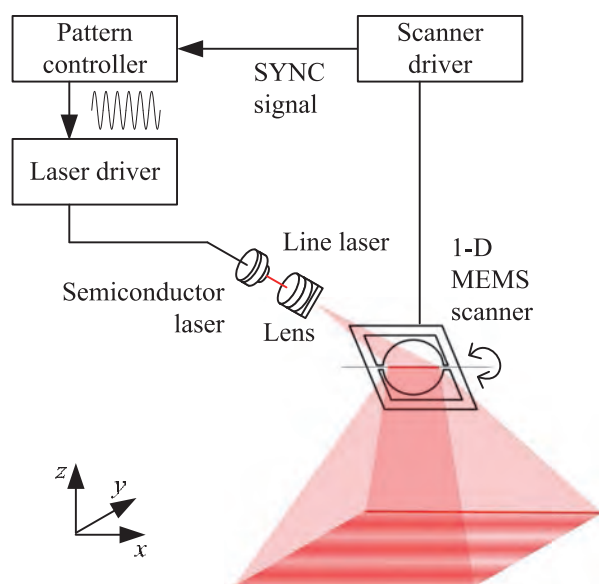


図 3.3 レーザー変調格子投影装置のブロック図

このとき、MEMS スキャナのミラーの回転軸を x 軸方向に向けておく。また、図 3.4 に示すように走査角度に同期して半導体レーザーの光強度をコントロールする信号に正弦波に変調した信号を与えることにより正弦波状の格子を投影することができる。さらに、レーザーに与える信号のタイミングをずらすことで位相シフトを行うことができる。

試作した投影装置とパターンコントローラーの写真をそれぞれ図 3.5(a), (b)に示す。出力されたラインレーザーは一次元 MEMS スキャナのミラーによって写真の右斜め下方向に反射され、ミラーの傾きを変化させることにより走査が行われる。ラインレーザーは、波長 660nm で出力 30mW のものを用いた。本投影装置を用いて正弦波状の格子を 800mm 離れた対象物に投影した写真を図 3.6 に示す。従来よく用いられているレンズの結像を利用した投影手法の場合は、焦点深度、すなわち格子が投影できる投影装置からの距離の範囲に限り

があるが，本投影装置は結像によるものではなく，レーザーの光強度を変調することで作られた格子のために，投影装置からの距離にかかわらずに投影することができる．また，正弦波状の格子以外の任意波形を投影したい場合は，半導体レーザーに与える信号を作成すれば可能である．パターンコントローラーは 8 種類のパターンを記憶できるメモリを持っており，外部からの指令後 1 走査時間で指令パターンに切替えることが可能である．

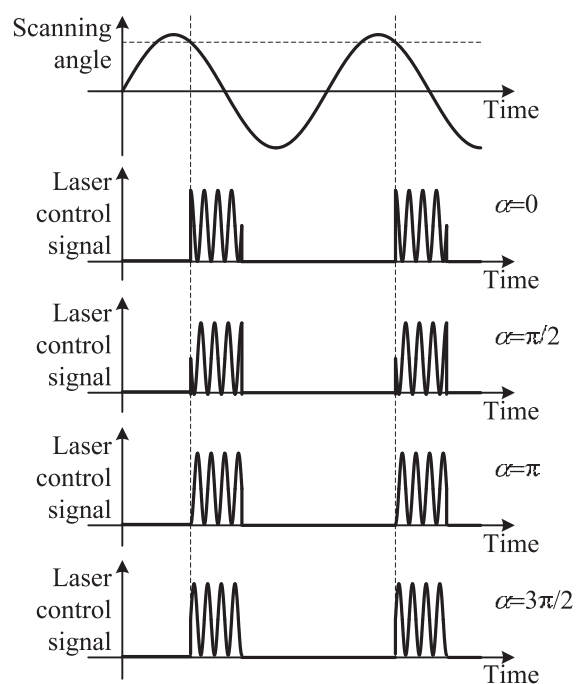
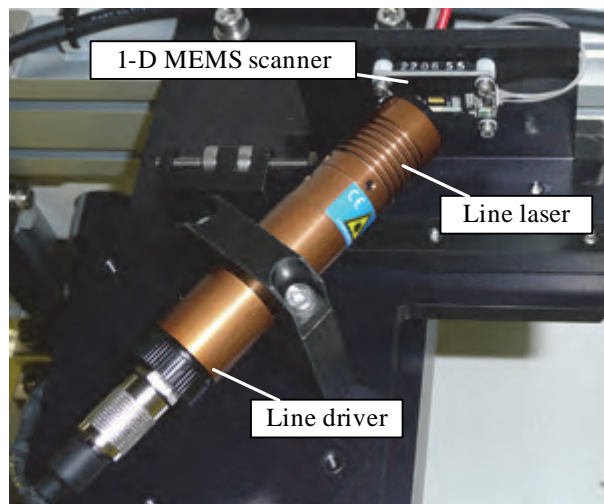
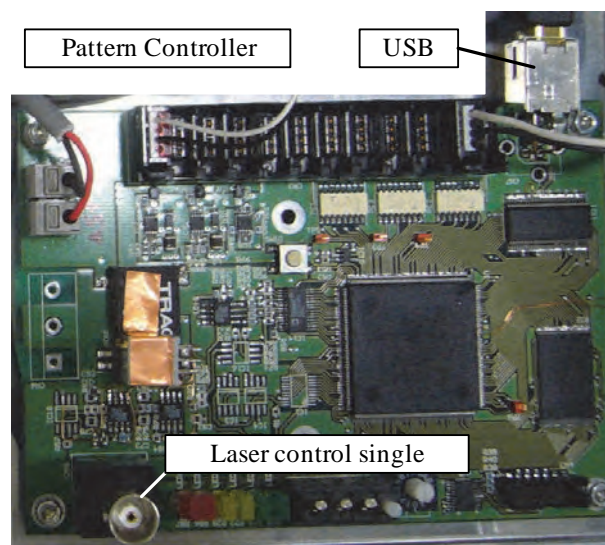


図 3.4 信号のタイミング



(a) 光学部分



(b) パターンコントローラー基板

図 3.5 試作したレーザー変調格子投影装置

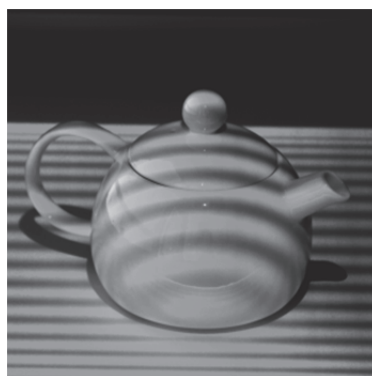


図 3.6 レーザー変調格子投影装置で陶器に投影している様子

3-4 2枚の基準面を用いた三次元計測

本投影装置を用いて正弦波状の格子を $\phi 150\text{mm}$ の平面試料に投影して、 $640\text{pixel} \times 480\text{pixel}$ の白黒 CCD カメラで撮影した。その時の実験装置の構成を図 3.7 に示す。また、撮影した画像を図 3.8 に示す。平面試料は水平に設置しており、平面試料から 800mm の高さにカメラと投影装置を設置している。カメラの光軸は鉛直下向きに設置しており、投影装置の光軸はカメラの光軸から 35° 傾けている。図 3.8 のライン A 上の輝度値を図 3.9(a)に示す。投影格子の位相を少しずつシフトさせながら撮影を行った画像中央の輝度変化をプロットで、最小二乗法で近似した正弦波を実線で図 3.9(b)に示す。図 3.9(a)では、レーザースペックルと投影面が均一でないため正弦波状の格子がくずれているが、図 3.9(b)ではほぼ正弦波状に変化していることが確認できる。

また、格子のピッチを変化させて、高さ 3mm の平板の計測を行った。これは、2 章で述べた位相シフト法と 2 枚の基準面を用いた高さ方向の解析を用いて、平面試料の位相分布を求め高さへ変換した。このときの 2 枚の基準面の間隔は 4mm とした。図 3.10 に中心部分 $300\text{pixel} \times 300\text{pixel}$ の範囲における高さの標準偏差の結果を示す。 25mm から格子のピッチが小さくなるにつれて高さの標準偏差は小さくなっていくが、 6mm 付近からは大きくなっている。これは、ラインレーザーの変調周波数が格子のピッチが小さくなるにつれて大きくなるためである。使用したラインレーザーの応答周波数は 200kHz で、格子のピッチ 6mm のときの変調周波数は約 100kHz である。

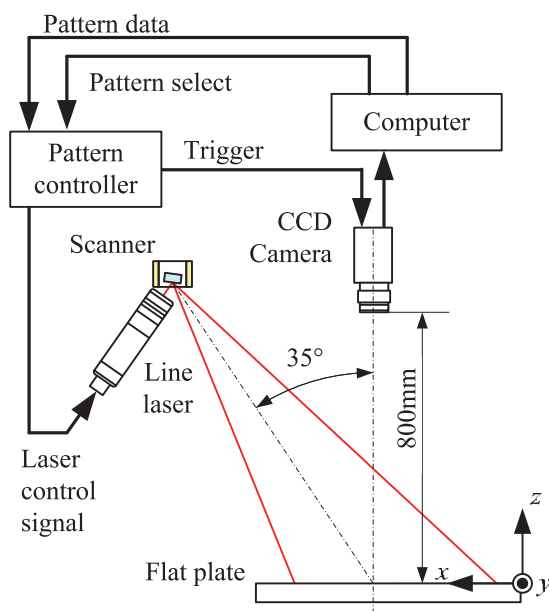


図 3.7 実験装置の構成

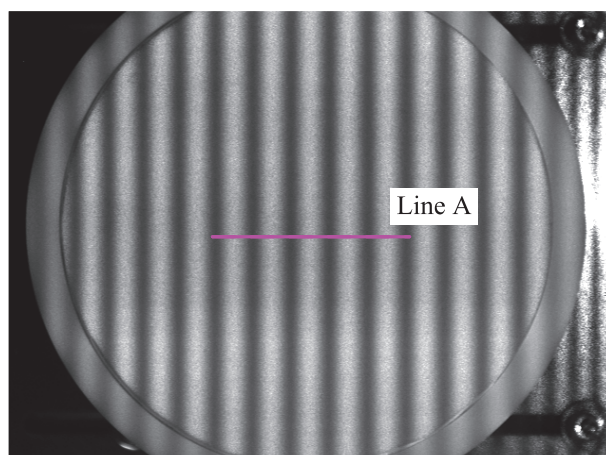
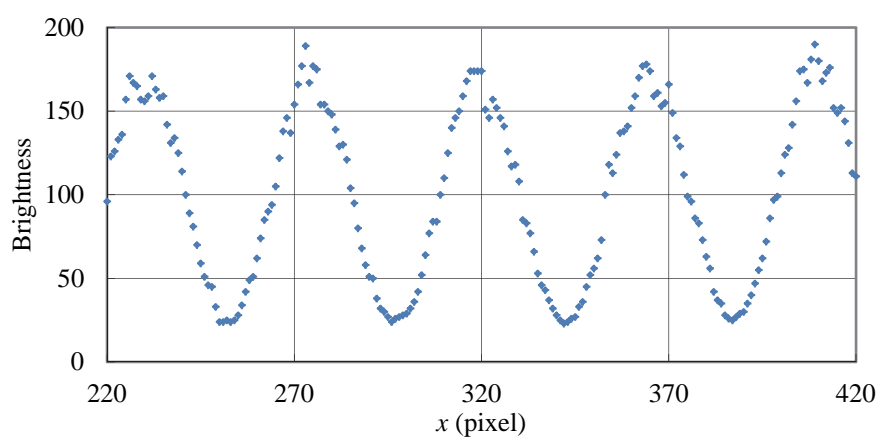
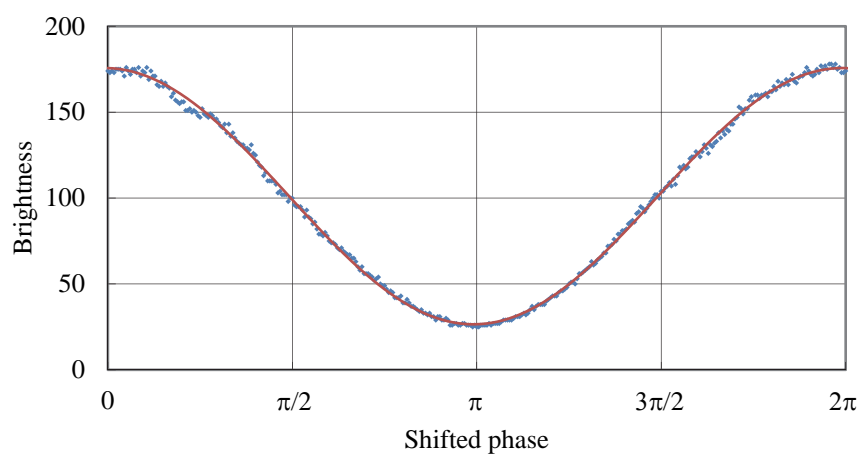


図 3.8 平面試料に投影した格子画像



(a) 図 3.8 のライン A の輝度分布



(b) ライン A の 320pixel における位相と輝度の関係

図 3.9 レーザー変調格子投影装置で投影した格子の輝度について

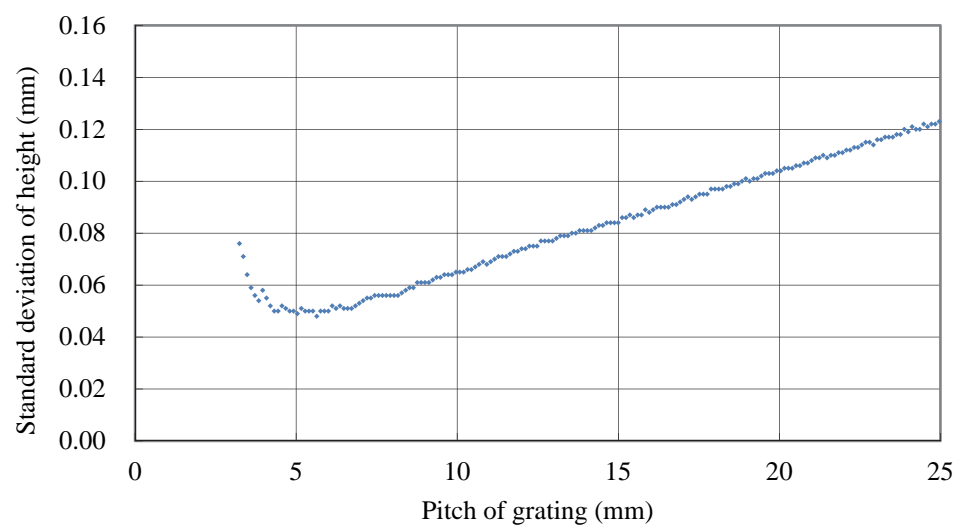


図 3.10 レーザー変調格子投影装置の格子ピッチと精度の関係

3-5 ビンピッキングへの適用

ビンピッキングとは箱の中などに三次元的にランダムに積まれている対象物の位置姿勢を推定してロボットなどで自動的に対象物の取出しを行うことである。本投影装置を用いた三次元計測装置をビンピッキングへ適用したデモ装置の外観写真を図 3.11 に示す。対象物は、将棋の駒とした。所定の位置にある将棋の駒が入れられている箱をロボットにて把持しテーブル上で反転することにより、将棋の駒がランダムに積まれた状態を作り出す。箱は所定の位置に戻しておく。テーブル上を計測することによりランダムに積まれた将棋の駒の三次元データを取得し、取出し可能な駒の位置姿勢を求める。図 3.12 のように将棋の駒と吸着ハンドの位置姿勢を合わせることによって取出しを行った後、箱に戻す。テーブル上の将棋の駒を全部取出したら、再度箱を反転させ将棋の駒がランダムに積まれた状態を作り出し、この動作を繰り返す。

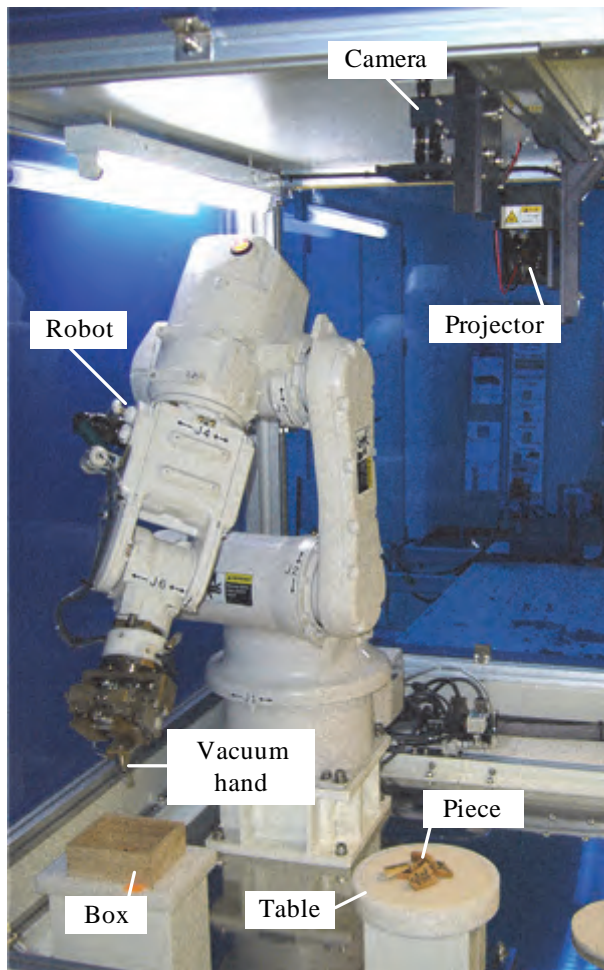


図 3.11 ビンピッキングシステム



図 3.12 将棋の駒の取出し

カメラと投影装置は、図 3.8 を撮影した条件と同じように設置している。投影装置の高さは、計測したい高さより十分大きいので位相からの高さへの変換は式(2.20)を用いて求めた。2 枚の基準面の間隔は 70mm とした。図 3.13(a)と(b)に将棋の駒に 2 種類のピッチの違う格子を投影した画像を示す。これらを用いて位相接続された位相分布を図 3.13(c)に、高さ分布を図 3.13(d)にそれぞれ示す。図 3.13(a)の格子のピッチは、図 3.10 からよい精度が得られた 6mm とした。図 3.13 (b)の格子のピッチは駒が積まれている場合や立っているときでも計測できるように 6.66mm とし、位相接続により約 80mm までの高さを計測することができるようにしている。この高さ分布を用いてビンピッキングを行ったところ、全ての駒を取りこぼしなく箱に戻すことができた。

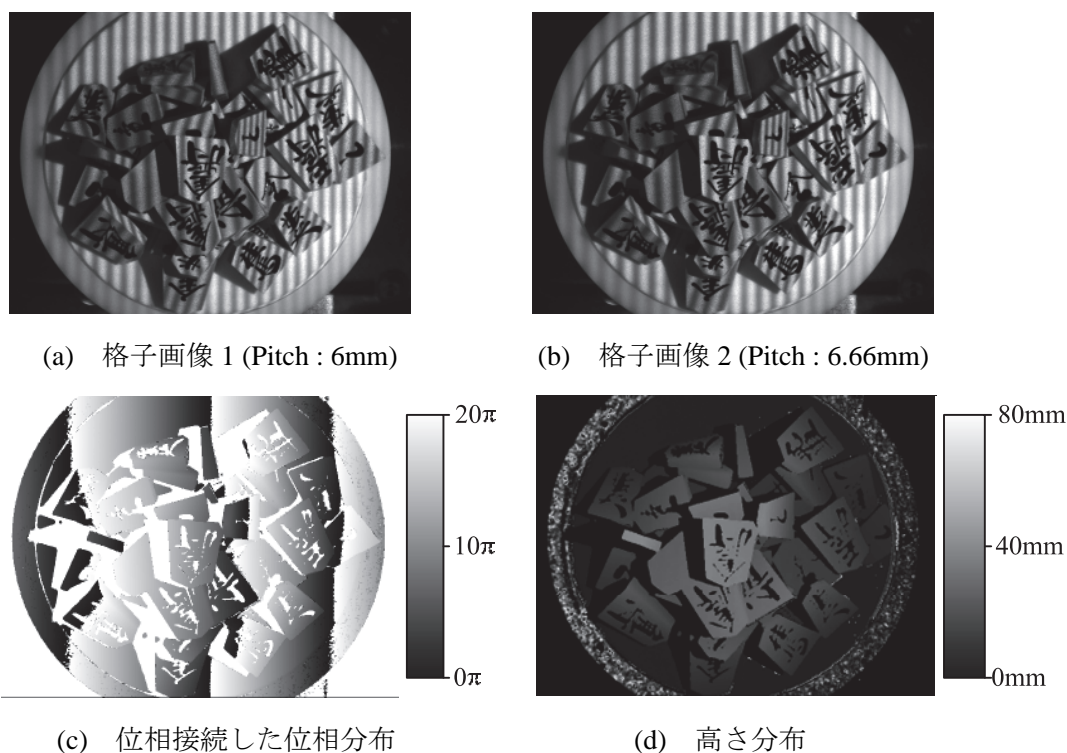
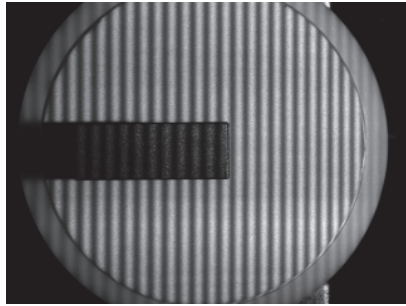
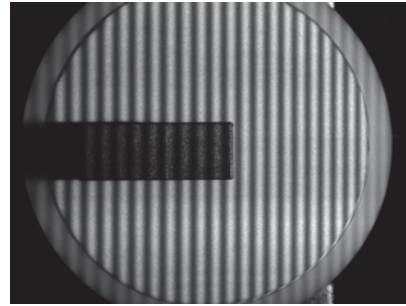


図 3.13 ビンピッキングシステム

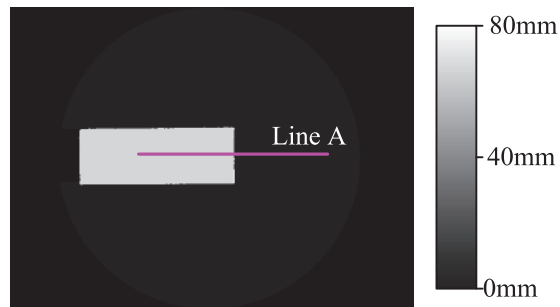
また、この条件で高さ 5.0mm の平板の上に高さ 65.0mm のブロックを置き計測した。ピッチ 6mm と 6.66mm の格子を投影した画像をそれぞれ図 3.14(a)と(b)に、高さ分布を図 3.14(c)にそれぞれ示す。図 3.14 (c)のライン A 上の断面形状を図 3.14 (d)に示し、そのブロック部分を拡大した断面形状を図 3.14 (e)に示す。ライン A 上にあるブロック部分の高さ平均値は 69.99mm で標準偏差は 0.06mm である。この結果により、深い計測範囲でも格子のピッチが小さい時の分解能で計測できていることを確認できた。



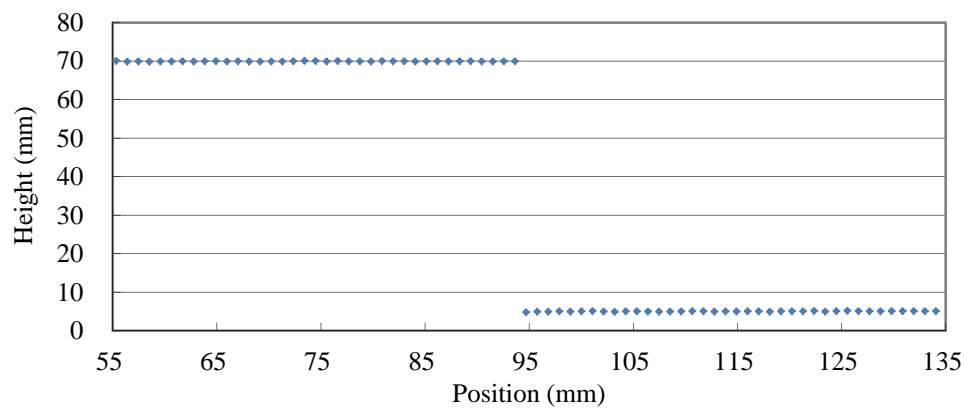
(a) 格子画像 1 (Pitch : 6mm)



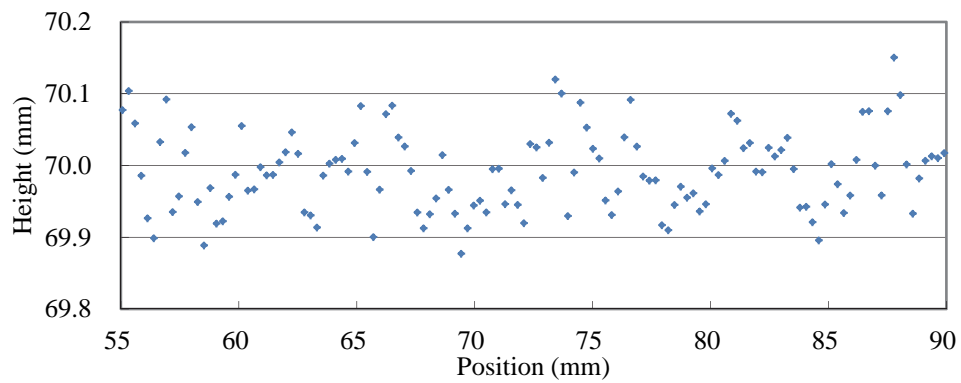
(b) 格子画像 2 (Pitch : 6.66mm)



(c) 高さ分布



(d) 図 3.14(c)のライン A の高さ分布



(e) 図 3.14(d)のブロックの高さ

図 3.14 ブロックの形状計測結果

3-6 複数の基準面を用いた三次元計測

試作したレーザー変調格子投影装置を使用し、2章で述べた位相シフト法、2種類の異なるピッチの格子による位相接続と多数の基準面を用いた校正手法を用いて三次元計測を行い、その精度検証を行なった。カメラは 640pixel×480pixel の白黒で視野は 200mm×140mm である。2種類の異なるピッチの格子の比率は、 $p_1:p_2=10:15$ とした。これにより位相接続後の最大位相は 6π になる。多数の基準面は、図 3.15 に示す Z ステージの任意の位置を高さ 0mm として、 $\phi 150\text{mm}$ の平板を 1mm ピッチで 50mm まで上昇させて位相を求めた。この Z ステージの位置は $1\mu\text{m}$ の分解能のリニアゲージによって検出される。それぞれの位置における位相を用いて補間を行い、位相ピッチ $6\pi/5000$ 毎の高さを求めた。

まず、Z ステージの位置を高さ 10mm に上昇させて繰り返し 30 回の計測を行った。図 3.16 に撮像した画像を示す。図 3.16 に示す 5 箇所の異なる位置で $\square 10\text{mm}$ 範囲を平均した計測結果を図 3.17 に示す。繰り返し計測結果の標準偏差は約 0.008mm であった。また、図 3.16 の画像中心横 1 ラインの高さ分布を図 3.18 に示す。平均は 10.004mm で標準偏差は 0.112mm であった。

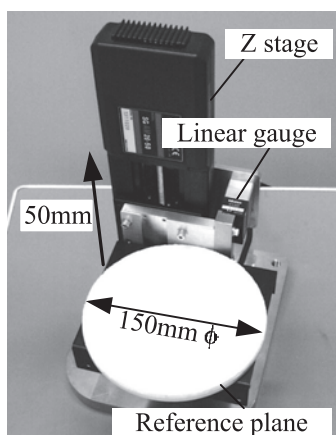


図 3.15 複数基準面用の Z ステージ

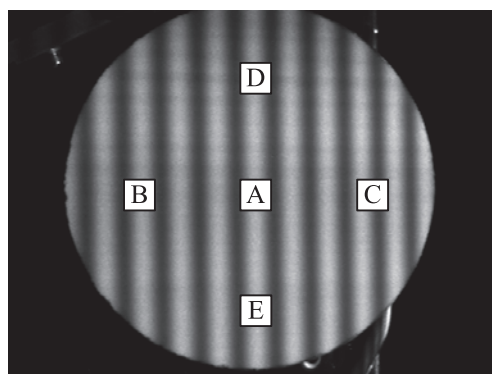


図 3.16 格子画像

さらに、Z ステージの位置を 0.1mm ピッチで 0mm から 50mm まで上昇させ計測を行った。図 3.16 に示す 5 箇所の異なる位置で $\square 10\text{mm}$ 範囲を平均した高さ と Z ステージの位置との誤差を図 3.19 に示す。Z ステージの位置 0mm から 50mm までの誤差の標準偏差は約 0.008mm であった。

試作したレーザー変調格子投影装置の格子ピッチは等間隔ではない。これは、MEMS スキャナの走査速度は正弦波状に変化するが、レーザーコントロール信号を一定周期の正弦波で変調しているためである。MEMS スキャナの走査速度を考慮して格子ピッチが等間隔になるようにレーザーコントロール信号を変調することも可能であるが、多数の基準面によって校正することで格子ピッチが等間隔でなくても精度のよい計測が可能であることを確認できた。

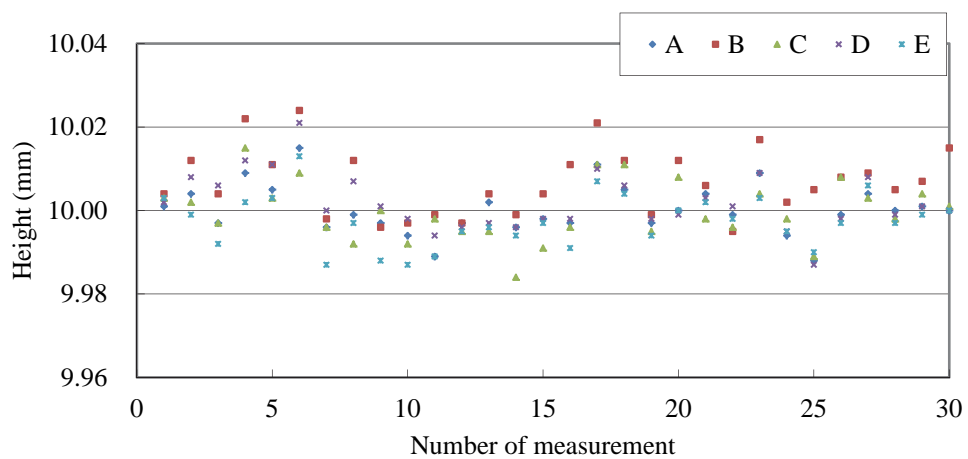


図 3.17 30 回の繰り返し計測結果

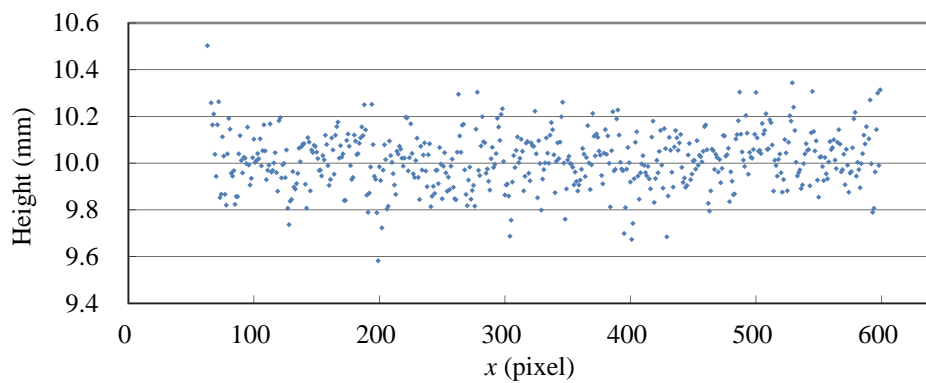


図 3.18 10mm の位置の基準面の横方向 1 ラインの高さ分布

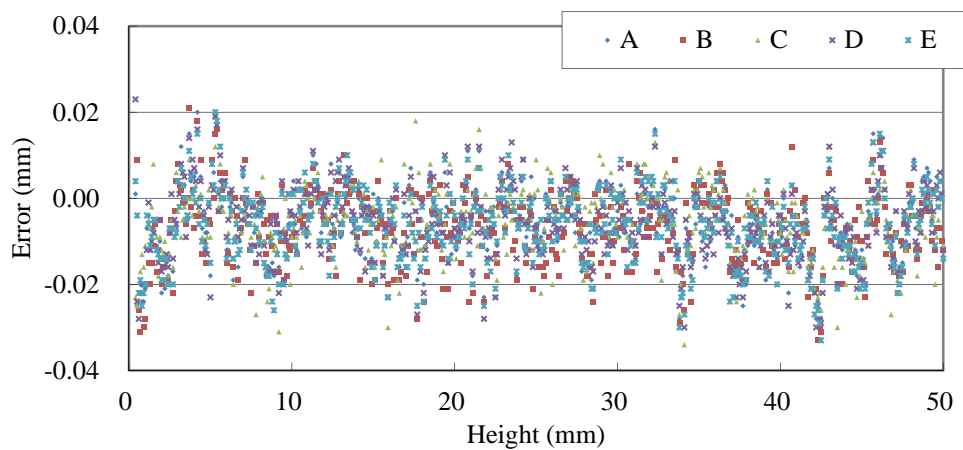


図 3.19 基準面の位置と計測結果の差

3-7 温度による計測誤差の補正

共振型スキャナの固有振動数は温度によって変化するため、駆動コイルに一定周波数で電流を印加していると走査角度範囲は変化する。これは、トーションバーのバネ定数が温度によって変化してしまうためである。走査角度範囲の変化によって、投影している格子のピッチは変化する。そのため、温度によって計測結果は異なってしまい、正確な計測を行うことができない。そこで、走査角度範囲の変化によって、格子ピッチの変化が起こらないような補正方法を提案する。

スキャナの走査角度範囲が $\pm A$ のとき、時刻 t における走査角度 θ は式 (3.1) で表される。 f_s はスキャナの走査周波数である。

$$\theta = A \sin(2\pi f_s t) \quad (3.1)$$

また、周波数 f_L の余弦波に変調したレーザーの光強度 $L_p(t)$ は式(3.2)で表される。

$$L_p(t) = \cos(2\pi f_L t) \quad (3.2)$$

式(3.1)と(3.2)より走査角度 θ におけるレーザーの光強度 $L_p(\theta)$ は、式(3.3)で表される。

$$L_p(\theta) = \cos\left(\frac{f_L}{f_s} \arcsin\left(\frac{\theta}{A}\right)\right) \quad (3.3)$$

ここでスキャナの走査角度範囲が $\pm \Delta A$ 増えて、 $\pm(A + \Delta A)$ になったとする。このときの時刻 t における走査角度 θ は式(3.4)で表される。

$$\theta = (A + \Delta A) \sin(2\pi f_s t) \quad (3.4)$$

走査角度範囲が変化しても格子のピッチが変化しないようにするためには、任意の走査角度におけるレーザーの光強度が同じになるように補正を行えばよい。走査角度範囲の変化率を R とするとレーザーの光強度 $L_p(t)$ は式(3.3)と(3.4)より式(3.5)で表される。

$$\begin{cases} L_p(t) = \cos\left(\frac{f_L}{f_s} \arcsin(R \sin(2\pi f_s t))\right) \\ R = \frac{A + \Delta A}{A} \end{cases} \quad (3.5)$$

走査角度範囲は、スポットレーザーなどの光源を走査させて、その走査線上の任意の位

置に設置しているセンサーを通過する時刻から求めることができる。

走査角度範囲の最小値を $\pm A_{\min}$ として、センサーを通過するときの走査角度 θ_p が $0 < |\theta_p| < A_{\min}$ の範囲になるように設置する。センサーを通過した時刻が t_1 のとき、走査角度範囲 $\pm A_1$ は式(3.1)より式(3.6)によって求めることができる。

$$A_1 = \frac{\theta_p}{\sin(2\pi f_s t_1)} \quad (3.6)$$

センサーを通過した時刻が t_1 から t_2 に変化したときの走査角度範囲変化率 R は、式(3.6)より式(3.7)で表される。

$$R = \frac{\frac{\theta_p}{\sin(2\pi f_s t_2)}}{\frac{\theta_p}{\sin(2\pi f_s t_1)}} = \frac{\sin(2\pi f_s t_1)}{\sin(2\pi f_s t_2)} \quad (3.7)$$

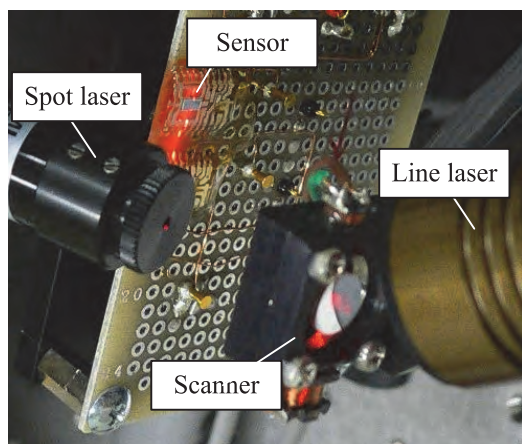
この式より、センサーの設置した位置がわからなくても走査角度範囲の変化率を求めることができ、式(3.4)により格子のピッチが変化しないように補正を行うことができる。

次に、この補正手法の有効性の確認を行う。投影装置部分の写真と実験装置の構成図をそれぞれ図 3.20(a)と(b)に示す。スキャナの片側のミラーは、ラインレーザーを走査しており、基準面に格子を投影する。コンピューターで作成したパターンデータをパターンコントローラーに送ることで任意の格子が投影できる。カメラは基準面の正面に設置されており格子画像を撮影して位相シフト法で位相分布を求める。

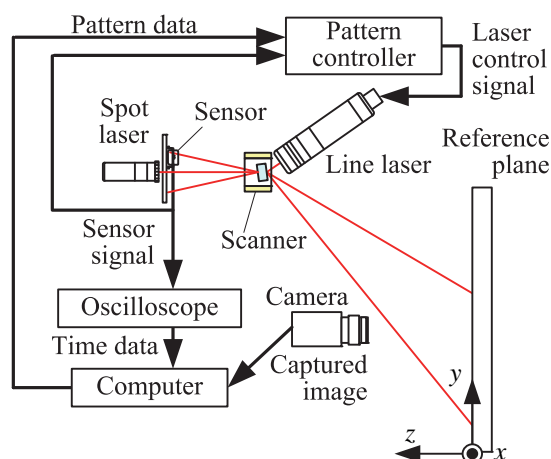
スキャナのもう片側のミラーは、スポットレーザーを走査している。その走査線上の任意の位置にセンサーを設置している。センサーの信号はパターンコントローラーに取り込みトリガーに使用する。また、オシロスコープで計測して、コンピューターに取り込む。センサーの信号は、図 3.21 に示すように走査角度 θ_p ときに出力される。走査方向のプラス方向とマイナス方向のときのセンサーの信号立ち上がりの時刻をそれぞれ t_{11} と t_{12} とすると、走査角度0度からの時刻 t_1 は式(3.8)より得られる。

$$t_1 = \frac{1}{4f_s} + \frac{t_{12} - t_{11}}{2} \quad (3.8)$$

式(3.7)と(3.8)を用いて走査角度範囲の変化量を求めて、式(3.5)を用いて補正を行う。



(a) 投影装置部分の写真



(b) システム構成図

図 3.20 実験装置

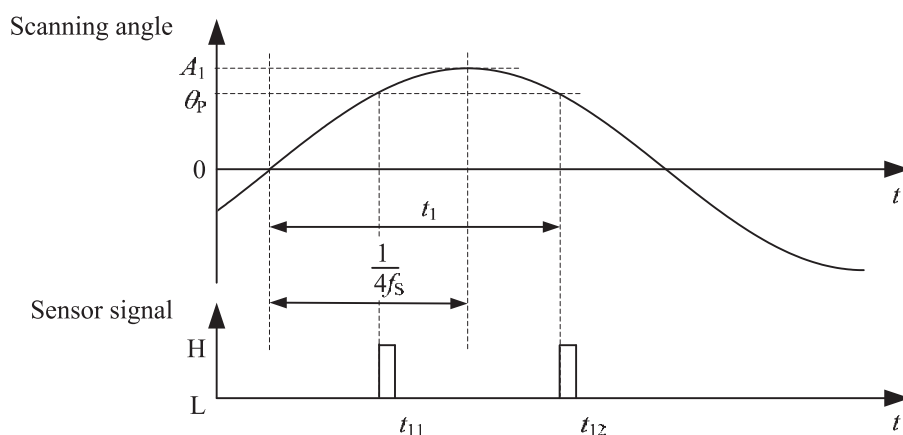
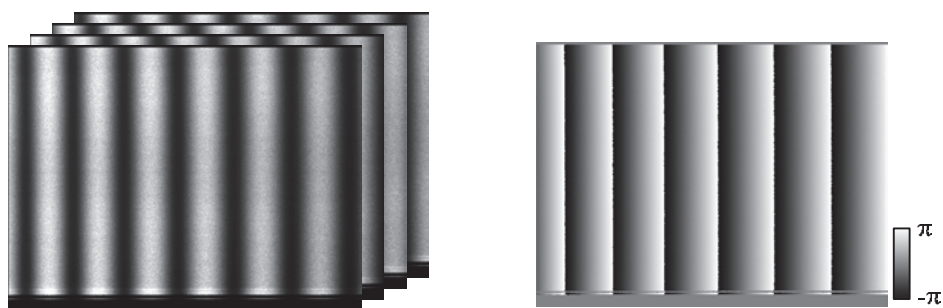
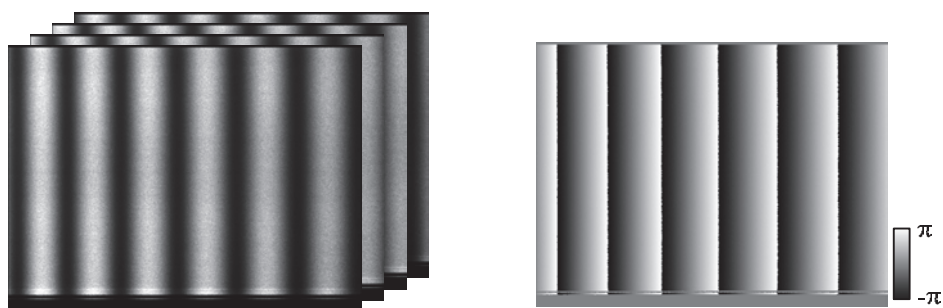


図 3.21 走査角度によるセンサーの出力信号変化

任意の走査角度範囲で式(3.2)の変調周波数 $f_L=10\text{kHz}$ として投影を行い、図 3.22(a)に示すような格子画像を撮影して基準となる位相分布を求めておく。走査角度範囲を人為的に変化させた後に、図 3.22(b)に示すような格子画像を撮影して求めた位相分布と基準の位相分布から、図 3.22(c)に示すような位相差分布を求める。図 3.22(c)中の $10\text{pixel} \times 10\text{pixel}$ の領域 A と B をそれぞれ平均した位相値を求めて、それらの位相差を格子のピッチの変化とする。格子のピッチが変化しなければ位相の差は 0 になる。走査角度範囲を ± 12.58 度から ± 13.24 度まで変化させて、格子の補正なしと補正ありの場合の位相の差を求めた。その結果を表 3.2 に示す。格子の補正を行うことによって格子のピッチの変化が少なくなっているのが確認できる。



(a) 基準の格子画像と位相分布



(b) 走査角度範囲変化後の格子画像と位相分布



(c) 位相差分布

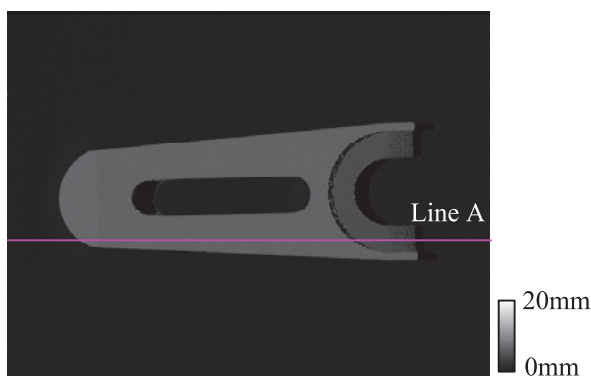
図 3.22 位相差分布

表 3.2 走査角度範囲変化による位相差

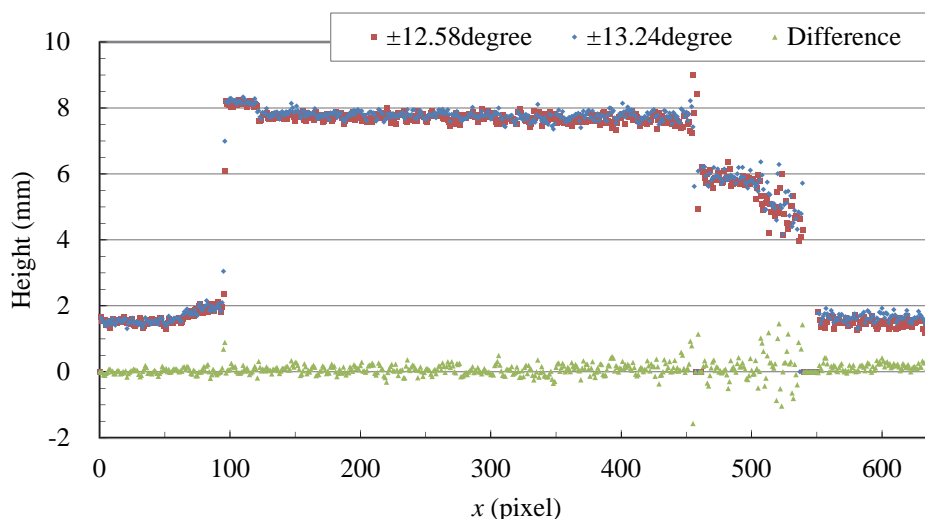
走査角度範囲	補正なしの位相差	補正ありの位相差
12.58	0.57	-0.23
12.70	26.64	-1.49
12.82	52.98	-1.40
12.96	79.91	-1.04
13.10	101.84	-1.32
13.24	124.57	-0.88

Unit [degree]

また、この補正手法を組み込んで三次元計測を行った。640pixel×480pixelの画素数のカメラを用いており、撮影範囲は100mm×75mmである。基準となる格子画像中心付近の縞のピッチは約16.5mmである。スキャナから基準面までの z 方向距離は360mmである。基準面に投影される y 方向の範囲は基準となる位相分布を求めたとき244mmで、走査角度範囲は ± 12.58 度である。この条件で金属加工品を試料として三次元計測を行った。走査角度範囲 ± 12.58 度のときの高さ分布を図3.23(a)に示し、 $y = 300\text{pixel}$ のラインA上の断面形状を図3.23(b)に示す。その後、走査角度範囲を ± 13.24 度に変化させて補正した格子で三次元計測を行った。 $y = 300\text{pixel}$ の断面形状と、走査角度範囲 ± 12.58 度との差を図3.23(b)に示す。走査角度範囲が変化しても同じ三次元計測の結果が得られている。このときの位相からの高さへの変換は式(2.21)を用いており、2枚の基準面の間隔は10mmとした。



(a) 高さ分布



(b) 走査角度変化による断面形状と差

図 3.23 金属加工品の三次元計測

3-8 レーザー変調格子投影装置の小型化

前節で提案した補正手法を用いた小型のレーザー変調格子投影装置の開発を行った。本投影装置の外観写真を図 3.24 に示す。寸法は 67mm×65mm×30mm で、重さは 300g である。これに用いた共振型スキャナの走査速度は 200Hz である。小型にすることで限られた設置スペースでも配置できるようになる。

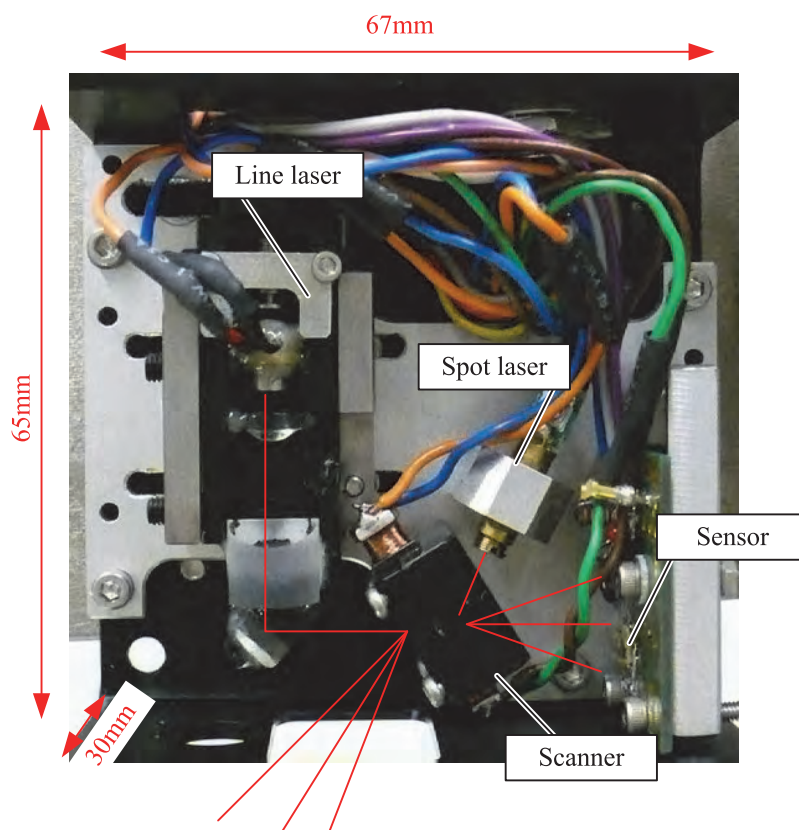


図 3.24 レーザー変調格子投影装置の小型化

3-9 おわりに

本章では、深さ方向に広い計測範囲で精度のよい計測ができるように 2 種類の異なるピッチの格子の投影が可能なレーザー変調格子投影装置の開発を行った。本投影装置は、最大 8 種類のパターンを記憶できるメモリを持っており、外部からの指令後 1 走査時間でそのパターンを切替えることが可能である。本格子投影装置の深さの広い格子投影が可能な特徴を活用できるように、2 種類の異なるピッチの格子を用いた位相接続によって計測範囲を 80mm まで拡大をした三次元計測装置の開発を行った。また、この三次元計測装置を産業用ロボットと組み合わせてビンピッキングに適用を行った。約 0.14s で 2 種類の異なるピッチの格子画像を取得することができた。ビンピッキングの用途では、十分高速である。

また、本投影装置は、全投影領域で投影された格子のピッチは一定でない。そのため、格子のピッチが一定でなくても精度のよい計測を行えるように、全空間テーブル化手法をキャリブレーションに適用した。その結果、50mm の計測範囲において標準偏差 0.112mm、誤差 0.004mm で高精度に計測することができた。

さらに、温度によって格子ピッチが変化する問題に対して、格子ピッチが変化しないように補正する手法の提案を行い、実験装置により補正が正しく行われていること確認した。また、本補正手法を用いた小型で軽量の格子投影装置を開発した。寸法は 67mm×65mm×30mm で重さは 300g である。FA 分野で用いるために十分小型・軽量である。しかし、本補正手法の補正に用いるセンサーの応答性能は、レーザー変調周波数に比例して計測精度に与える。そのため、走査周波数 200Hz の低速な共振型スキャナを用いることで、相対的にレーザー変調周波数を低くしている。これは、用途によって位相シフト速度が十分ではない。この課題は、応答性能のよいセンサーを用いることで解決することが可能である。

4. 複数ライン LED 格子投影装置の開発

4-1 はじめに

自動化された生産設備の検査工程に、位相シフト法による格子投影型三次元計測を用いることが必要とされている用途の一つとして、ベルトコンベア上を停止することなく移動している対象物の検査がある。この検査に二次元画像計測を用いる場合は、撮影をしている間の対象物の移動距離を短くするため、露光時間は 1ms 程度である。そのため、三次元計測を用いる場合も、位相シフトされた格子画像を 1ms 程度で取得する必要がある。このような用途には、第 3 章で述べたレーザー変調格子投影装置より、さらに高速な位相シフト機構をもつ格子投影装置が必要である。

そのような位相シフト機構をもつ格子投影手法として、光源切替位相シフト法[26-28]がある。この手法は、ガラス格子の影で格子投影を行うため、 z 方向においてはどの場所でも格子投影が可能である。また、機械的な位相シフト機構を必要とせず、光源を切り替えることで格子の位相をシフトさせることができるため高速である。さらに、この手法を用いた格子投影装置は、ガラス格子と光源のみで構成できることから、安価で小型・軽量化も可能である。この手法は、測定範囲によって位相のシフト量が違うため、補正計算による三次元計測が困難だったが、全空間テーブル化手法[49]の導入により解析が可能になった。先行研究では、光源切替位相シフト法の原理を確認する実験を行ったが、光量が足りないため精度よく解析するには至らなかった。

そのため本章では、先行研究から、実用化のために専用設計した複数ライン LED デバイス[29-32]の開発を行う。4-2 節では、光源切替位相シフト法の原理について述べる。4-3 節では、実用化のために高密度に LED 素子を実装した、高密度複数ライン LED デバイスの開発を行う。また、その LED デバイスを用いて開発した格子投影装置の構成と特徴について述べる。4-4 節では、平面試料を三次元計測した結果について述べる。4-5 節では、高密度複数ライン LED デバイスから高輝度化のため、大きな LED 素子を用いた高輝度複数ライン LED デバイスの開発を行う。その LED デバイスを用いて開発した格子投影装置の構成と特徴について述べる。4-6 節では、高密度複数ライン LED デバイスを用いた格子投影装置の位相シフト機構の応答速度[32]の評価を行う。4-7 節では、開発した三次元計測装置を用いて、対象物を移動させながら三次元計測を行い、本手法の有効性を確認する。4-8 節では、本章のまとめを記す。

4-2 光源切替位相シフト法

光源切替位相シフト法とは，格子投影法の一つである．従来の格子投影法と違い，光源の点灯位置を切り替えることで，位相シフトを行うことが可能である．その様子を図 4.1 に示す．また，図 4.2 に示した通り，本手法は格子ガラスの影で格子投影を行うため， z 方向においてはどの場所でも投影が可能である．

本手法は，光源の幅が十分小さく，それぞれが点光源と考えることができるため，投影格子は余弦波状と考えることができる．その様子を図 4.3 に示す．任意の点 $P(x_p, z_p)$ において以下のような式が成り立つ．2 値の格子模様の分布である点 $G(x_G, 0)$ において，投影格子が余弦波状に近づくことから余弦波状の分布と考えることができる．そのため $G(x_G, 0)$ における位相 $\phi_G(x)$ は，式(4.1)のように表される．

$$\phi_G(x) = \frac{2\pi}{p} x \quad (4.1)$$

光源 $L(x_L, z_L)$ と任意の点 $P(x_p, z_p)$ を直線で結んだ時の直線 PL は，式(4.2)のようにあらわされる．

$$x = \frac{x_p - x_L}{z_p - z_L} (z - z_p) + x_p \quad (4.2)$$

式(4.2)より，点 $G(x_G, 0)$ は，式(4.3)のように表される．

$$x_G = -z_p \frac{x_p - x_L}{z_p - z_L} + x_p \quad (4.3)$$

式(4.1)，式(4.3)より点 $G(x_G, 0)$ における $\phi_G(x)$ は，式(4.4)のように表される．

$$\phi_G(x_G) = \frac{2\pi}{p} \left(-z_p \frac{x_p - x_L}{z_p - z_L} + x_p \right) \quad (4.4)$$

点 $G(x_G, 0)$ における $\phi_G(x)$ は，点 $P(x_p, z_p)$ における位相 $\phi(x_p, z_p)$ に等しい．そのため，点 $P(x_p, z_p)$ における位相 $\phi(x_p, z_p)$ は式(4.5)のようにあらわされる．図 4.3 にその原理図を示す．

$$\phi(x_p, z_p) = \frac{2\pi}{p} \left(-z_p \frac{x_p - x_L}{z_p - z_L} + x_p \right) \quad (4.5)$$

一つの光源における位相を求めた後，コサインでラッピングを行う．このようにすると，任意の点にお

ける輝度値 $I(x_p, z_p)$ は式(4.6)となる.

$$I(x_p, z_p) = \cos \phi(x_p, z_p) \quad (4.6)$$

光源ごとにこれらの計算を行い, 式(4.7)に示す位相シフトの基礎式に代入することで, 本手法を用いて計算できる位相 $\theta(x_p, z_p)$ を求めることができる.

$$\tan \theta(x_p, z_p) = -\frac{\sum_{k=0}^{n-1} I_k \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right)}{\sum_{k=0}^{n-1} I_k \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right)} \quad (4.7)$$

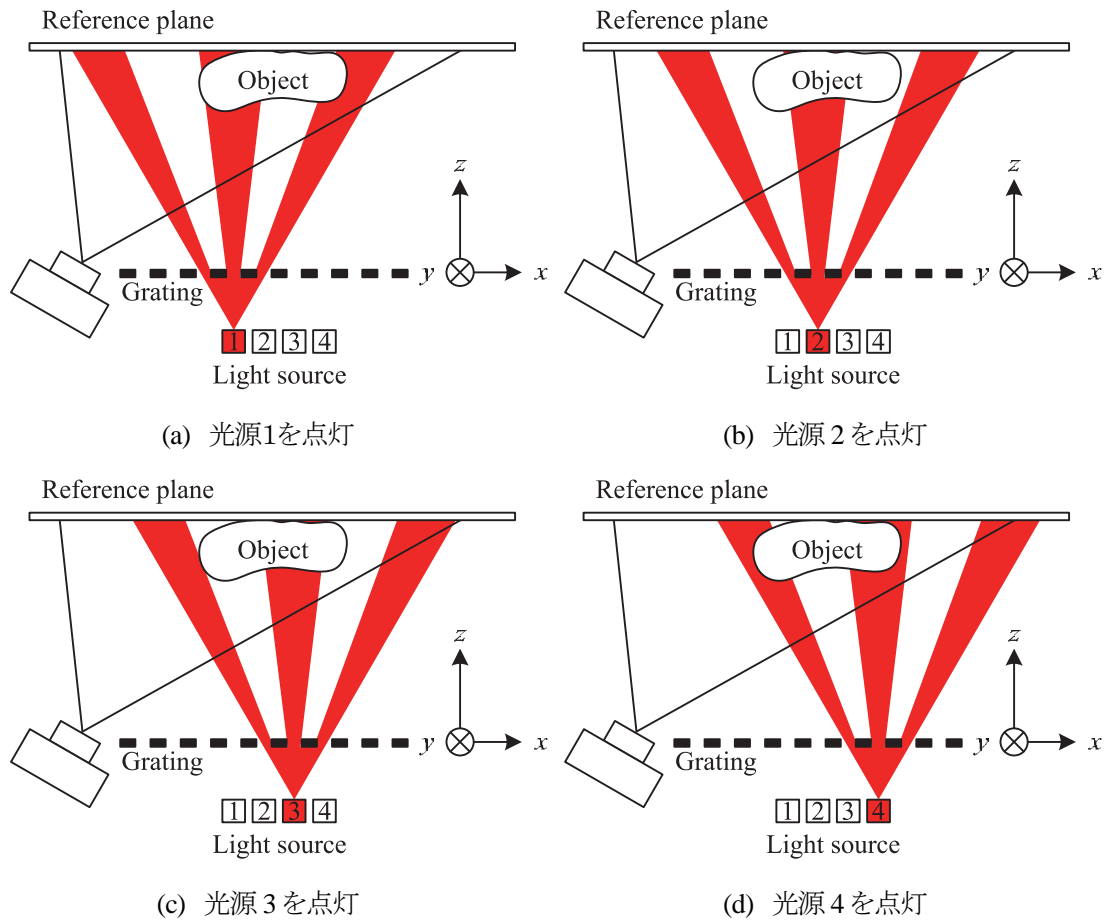


図 4.1 光源切替位相シフト法の計測原理図

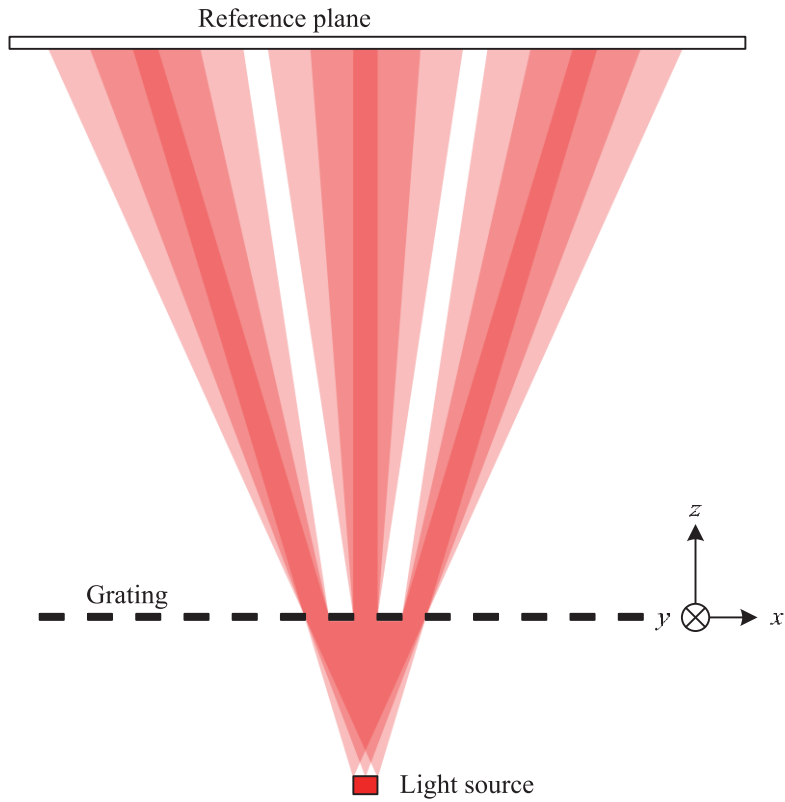


図 4.2 光源切替位相シフト法における光の広がりの様子

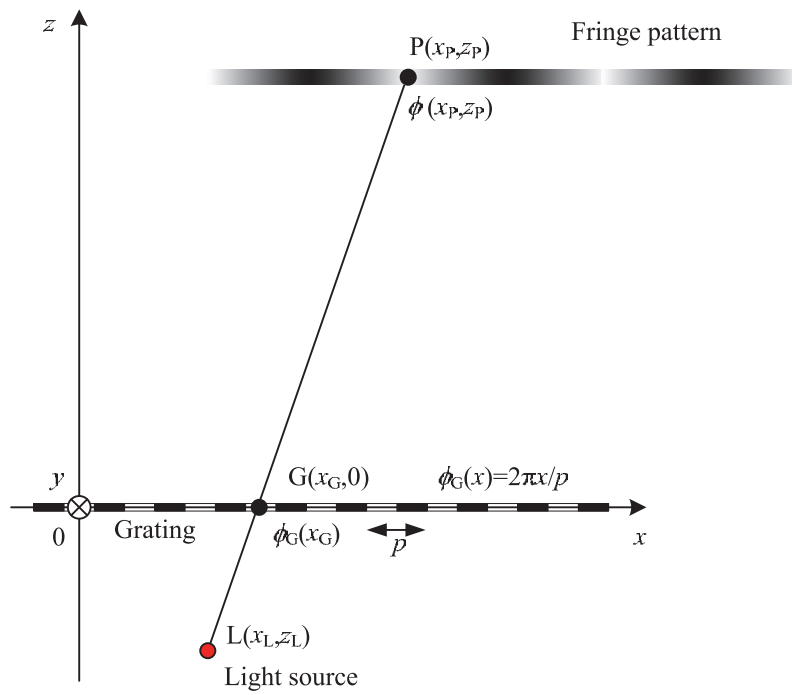


図 4.3 光源から任意の点 $P(x_P, z_P)$ における位相

4-3 高密度複数ライン LED 格子投影装置

光源切替位相シフト法による格子投影装置に用いる複数ライン LED デバイスの開発を行った。開発した複数ライン LED デバイスを図 4.4 に示す。これは、LED 素子をライン状に 30 個配置した 9 ラインの光源で、ラインの間隔は 0.5 mm であり素子のサイズは 0.35mm×0.35mm である。この LED デバイスを用いて試作した格子投影装置を図 4.5 に示す。ガラス格子には Edmund Optics 社製の 50LPI のロンキー・ルーリングを使用している。LED デバイスは図 4.6 に示す LED コントローラーに接続されており USB や IO によって点灯消灯や光量変更を行うことができる。LED を点灯するタイミングでカメラトリガー信号を出力することで同期した画像を取得することが可能である。本格子投影装置の寸法は 55mm×59mm×65mm で、重さは 240g であるため、FA 分野に用いるために十分小型・軽量である。

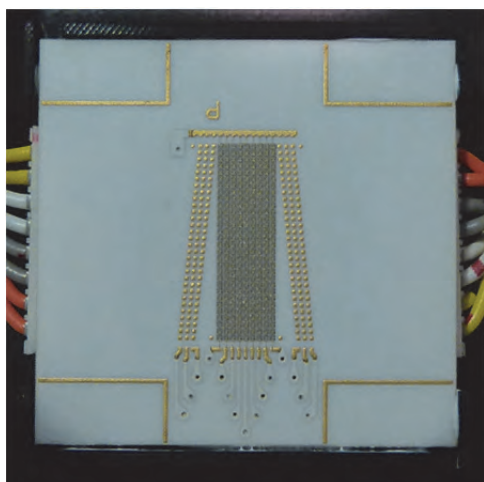


図 4.4 高密度複数ライン LED デバイス

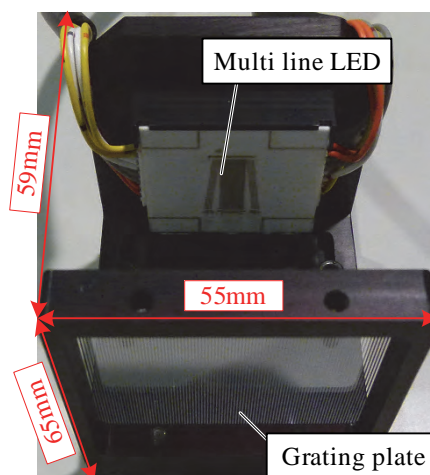


図 4.5 高密度複数ライン LED 格子投影装置

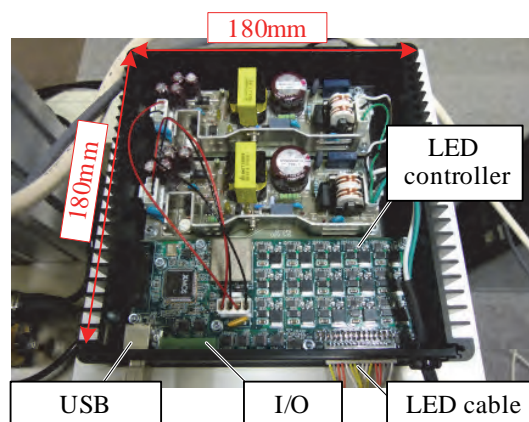


図 4.6 高密度複数ライン LED コントローラー

4-4 平面試料の計測精度

高密度複数ライン LED 格子投影装置と PhotonFocuss 社の白黒 CMOS カメラ MV-D1024E-80-CL を用いた三次元計測システムを製作した. そのシステムを図 4.7 に示す. カメラの画素数は $512\text{pixel} \times 512\text{pixel}$, 露光時間は 40ms である. LED デバイスと格子の間隔は 30mm で LED デバイスと基準面の間隔は 180mm である. L0 から L4 まで LED デバイスの点灯位置を変えながら基準面に投影した, 格子画像の y 方向中央における x 方向の輝度分布を図 4.8 に示す. 点灯位置を変えることで, 位相シフトされていることがわかる. また, ほぼ余弦波状の輝度分布が得られている.

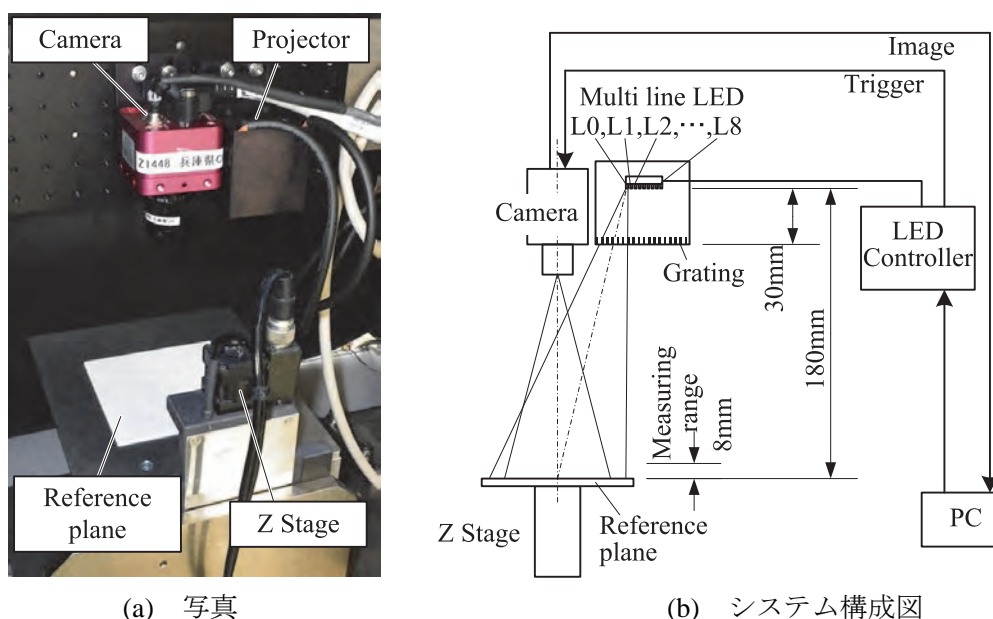


図 4.7 平面試料計測精度検証用のシステム

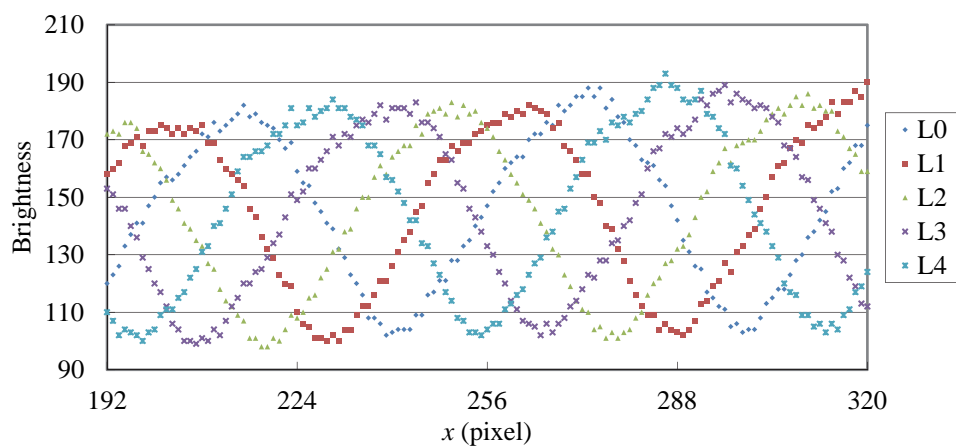


図 4.8 y 方向中央における x 方向の格子画像輝度分布

L0 から L3 の LED を用いて基準面に投影した格子画像を撮像し、式(4.7)の $n=4$ として位相解析を行った。y 方向中央における x 方向の位相分布を図 4.9 に示す。 $-\pi$ から π の間を繰り返しており、繰り返しのない一つの $-\pi$ から π の区間の間では直線状ではないものの一価関数となっているが、理論的な精度よい位相が得られていないことがわかる。また、基準面の高さを 0.2mm ずつ変えながら位相分布を求めた。画像中心の位相分布を図 4.10 に示す。z 方向と位相との関係も同様に直線状になっていないことがわかる。

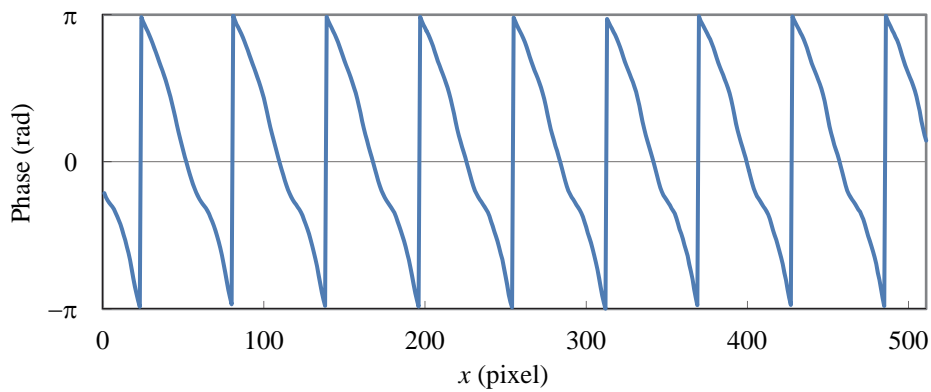


図 4.9 基準面の x 方向の位相分布 ($n=4$)

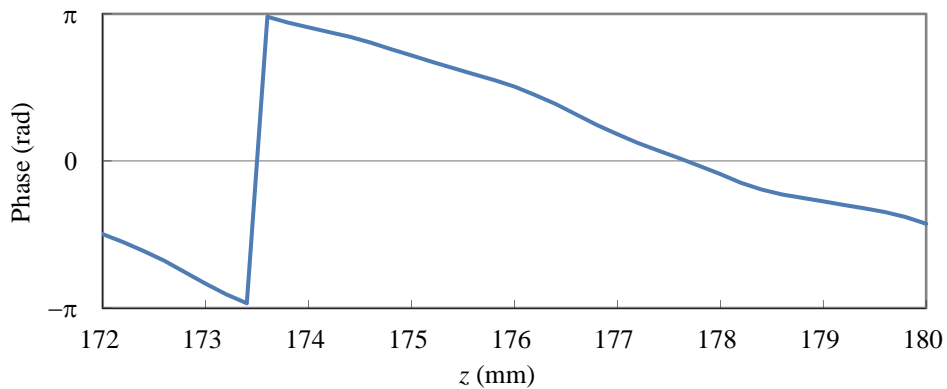


図 4.10 基準面の z 方向の位相分布 ($n=4$)

同様に L0 から L5 の LED を用いて $n=6$ として位相解析を行った。y 方向中央における x 方向の位相分布を図 4.11 に示す。画像中心の z 方向の位相分布を図 4.12 に示す。 $n=4$ の場合と比較すると位相分布が直線状に変化している。このように、z の位置によって位相シフトする量が違うため n の値により直線性が異なってくることがわかる。

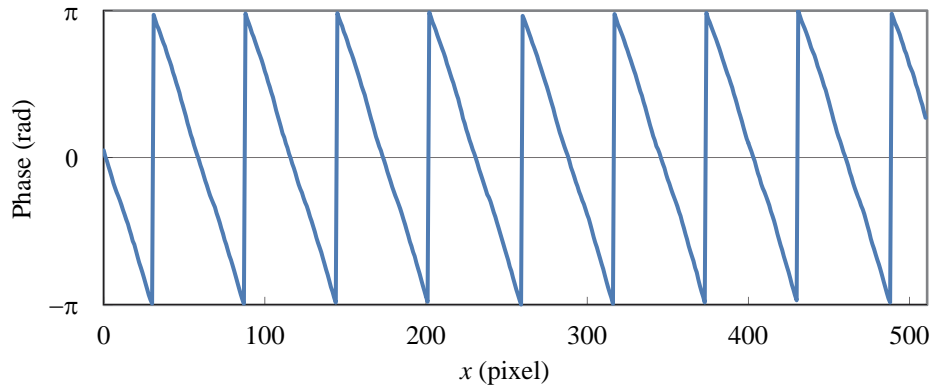


図 4.11 基準面の x 方向の位相分布 ($n=6$)

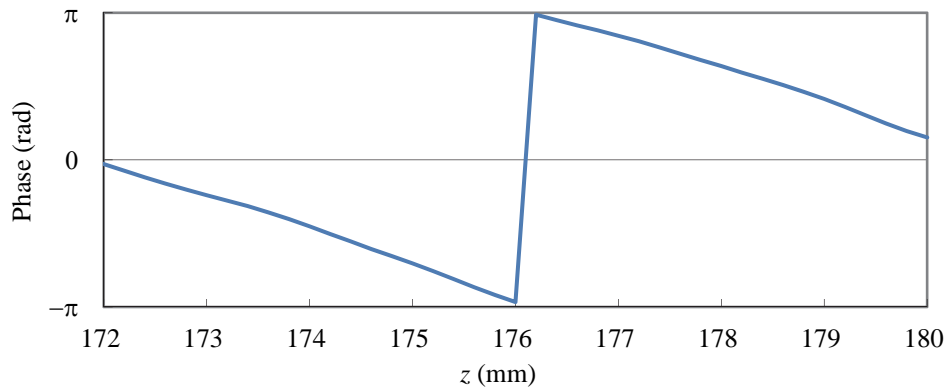


図 4.12 基準面の z 方向の位相分布 ($n=6$)

また、平面試料を用いて精度の検証を行った。全空間テーブル化手法の基準面枚数は、0mm から 8mm まで 0.2mm 間隔の 41 枚とした。この条件でキャリブレーションを行った後、基準面を平面試料として計測を行った。基準面は 1mm から 7mm まで 1mm 間隔で移動させて、 $n=4$ と $n=6$ の場合の計測をそれぞれ行った。その時の y 方向中央における x 方向の高さ分布をそれぞれ図 4.13 と図 4.14 に示す。また、この 1 ライン 512 点のデータを用いて、平均誤差と標準偏差を求めた結果をそれぞれ表 4.1 と表 4.2 に示す。平均誤差は、 $n=4$ の場合のほうが $n=6$ の場合よりもよく、標準偏差は、 $n=4$ の場合のほうが $n=6$ の場合よりも悪いが、どちらの場合でも、平均誤差 0.005mm 以下、標準偏差 0.019mm 以下で精度よく計測することができる。

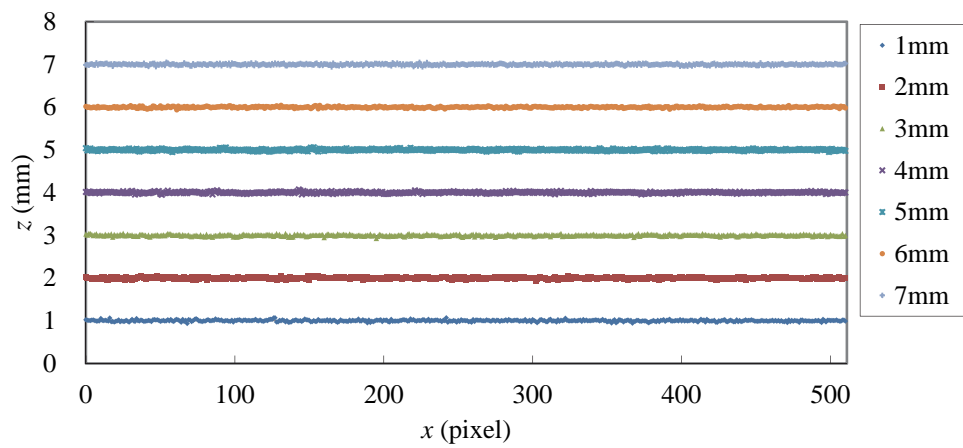


図 4.13 基準面の x 方向の高さ分布 ($n=4$)

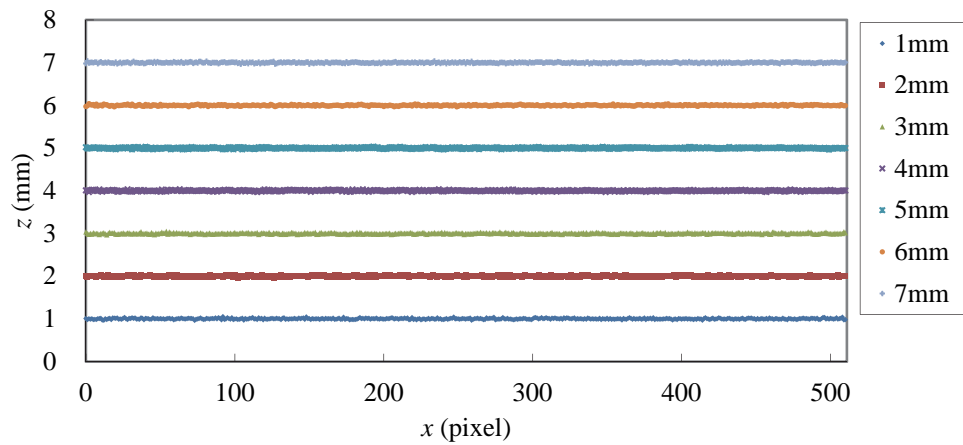


図 4.14 基準面の x 方向の高さ分布 ($n=6$)

表4.1 基準面高さ計測結果 ($n=4$)

高さ	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000
平均	1.003	2.002	3.002	4.002	5.001	6.001	7.000
誤差	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000
標準偏差	0.019	0.018	0.017	0.017	0.017	0.015	0.017

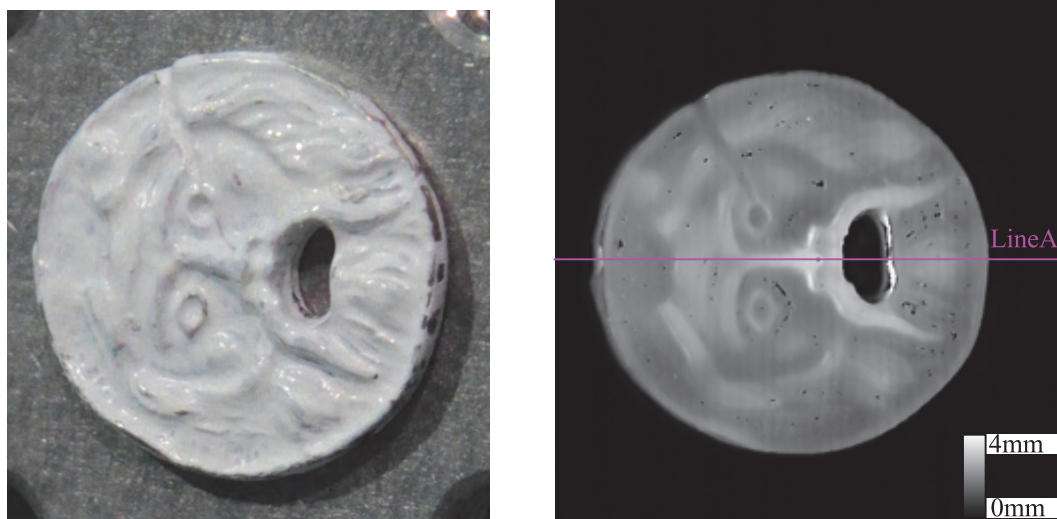
Unit[mm]

表4.2 基準面高さ計測結果 ($n=6$)

高さ	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000
平均	1.005	2.003	3.004	4.002	5.001	6.002	7.000
誤差	0.005	0.003	0.004	0.002	0.001	0.002	0.000
標準偏差	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011

Unit[mm]

例として $n=6$ のときの顔模型の成型品の三次元計測した高さ分布を図 4.15 に示す. 図 4.15(b)のライン A 上の高さ分布を図 4.16 に示す. 端面部分などは計測できていないが, ほぼ全面で三次元計測を行うことができています.



(a) 写真

(b) 高さ分布

図 4.15 顔模型の成型品の計測結果($n=6$)

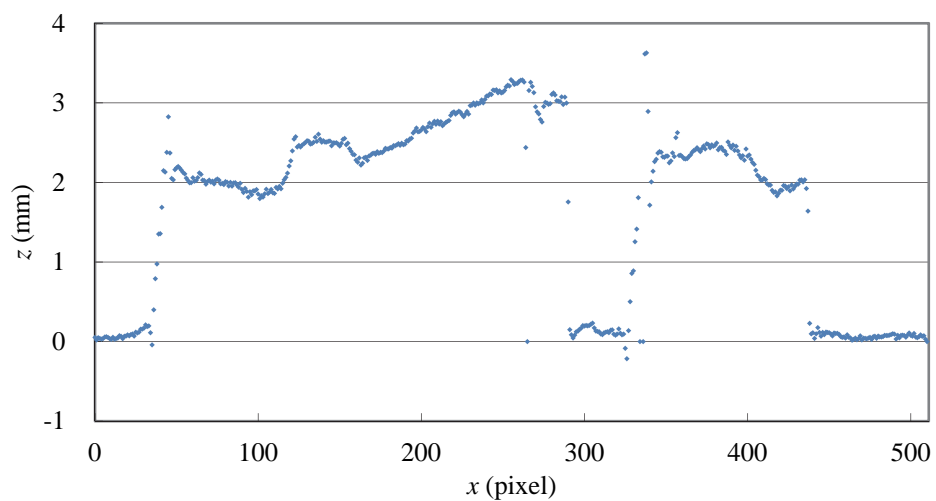


図 4.16 図 4.15(b)のライン A 上の高さ分布

4-5 高輝度複数ラインLED格子投影装置

高速な三次元計測を行う場合、その速度に応じてカメラの露光時間は短くなる。短い露光時間で振幅輝度の高い格子画像を得るためには、明るい光源が必要である。そこで、高輝度な LED 素子を用いた高輝度複数ライン LED デバイスの開発を行った。開発した高輝度複数ライン LED デバイスを図 4.17 に示す。これは、LED 素子をライン状に 10 個配置した 9 ラインの光源で、ラインの間隔は 1.69mm であり、素子のサイズは 1mm×1mm である。この光源を用いて試作した格子投影装置を図 4.18 に示す。ガラス格子は、格子ピッチ 1.6mm のものを使用している。LED デバイスは投影装置内に入るように小型化した LED コントローラーに接続されており USB や IO によって点灯消灯や光量変更を行うことができる。LED を点灯するタイミングでカメラヘトリガー信号を出力することで高速に画像を取得することが可能である。本格子投影装置の寸法は 77mm×92mm×69mm で、重さは 450g と小型・軽量であり、FA 分野に用いることが可能である。

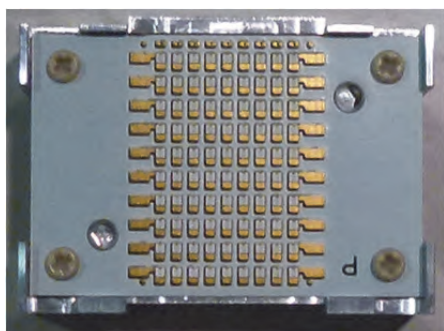


図 4.17 高輝度複数ライン LED デバイス

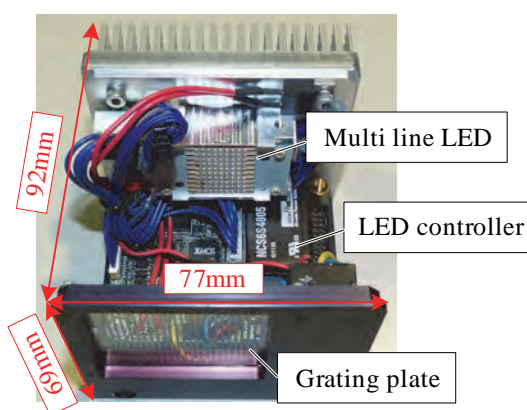


図 4.18 高輝度複数ライン LED
格子投影装置

また、本投影装置を用いて平面試料の三次元計測を行い精度の検証を行った。カメラの画素数は 512pixel×512pixel である。高さ 0mm から 25mm まで 5mm ピッチで基準面の高さを変えて、それを平面試料として三次元計測を行った。画像中心座標の横方向 512pixel の結果を図 4.19 および表 4.3 に示す。平均誤差 0.003mm 以下、標準偏差 0.033mm 以下で精度よく計測を行うことができている。

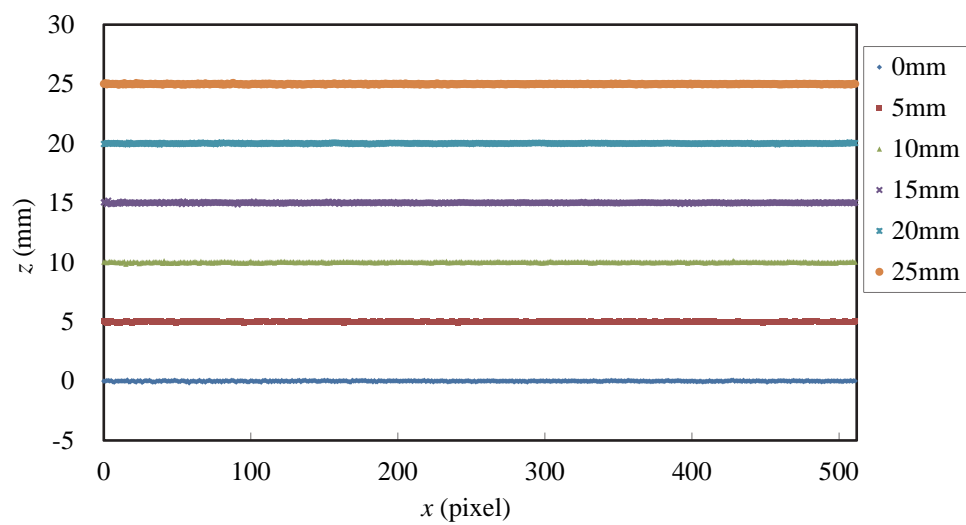


図4.19 基準平面高さ分布

表4.3 基準面高さ計測結果

高さ	0.000	5.000	10.000	15.000	20.000	25.000
平均	-0.002	4.998	9.998	15.001	20.000	24.997
誤差	-0.002	-0.002	-0.002	0.001	0.000	-0.003
標準偏差	0.032	0.032	0.032	0.033	0.027	0.024

Unit[mm]

4-6 位相シフト機構の応答速度評価

本節では、1ラインのLEDの振幅特性の計測を行い、どこまで高速に格子の位相をシフトさせることが可能か調査をした。

実験には、4-3節で開発した高密度複数ラインLEDデバイスを用いた。複数ラインLEDデバイスの駆動回路図を図4.20に示す。複数ラインLEDデバイスのスイッチには東芝セミコンダクター社のトランジスタ2SC2240を用いた。DC電源の電圧は117Vで、1ラインのLEDを点灯させたときに流れる電流は113mAである。実験装置の構成を図4.21に示し、LEDとフォトセンサーアンプの配置を図4.22に示す。トランジスタのベースには、ファンクションジェネレーターで発生させた矩形波信号を入力している。光検出器に浜松フotonクス社製のPINフォトダイオードS5973とフォトセンサーアンプC8366を用いた。フォトセンサーアンプの応答周波数は、100MHzである。フォトセンサーアンプからの出力はオシロスコープで取得している。同時にファンクションジェネレーターで生成した矩形波も取得している。

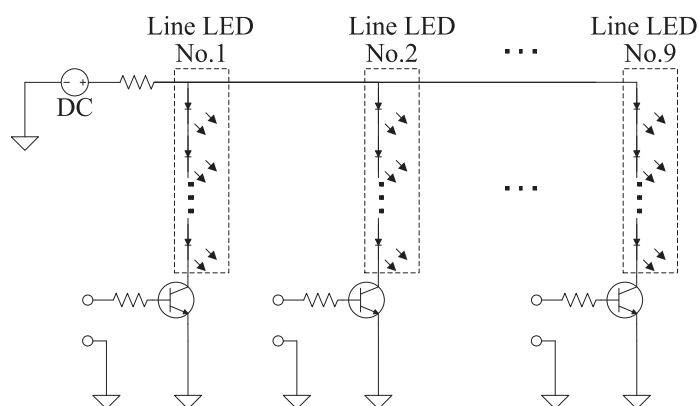


図4.20 駆動回路図

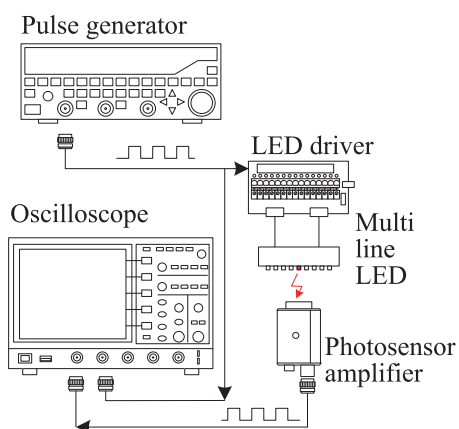
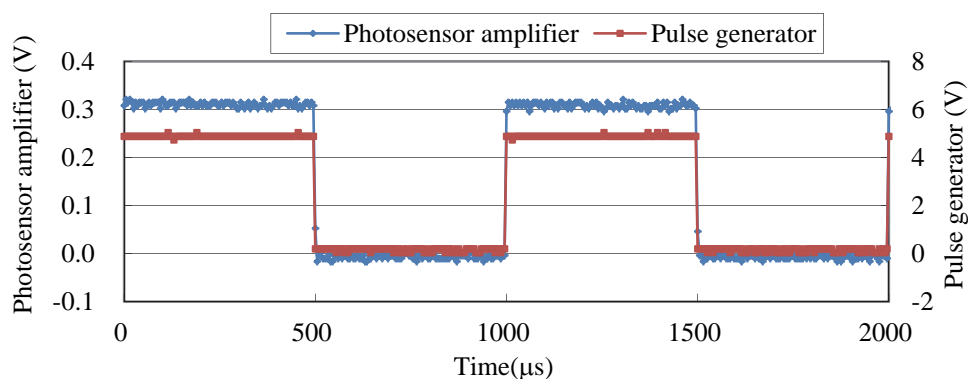


図 4.21 応答速度確認実験システム

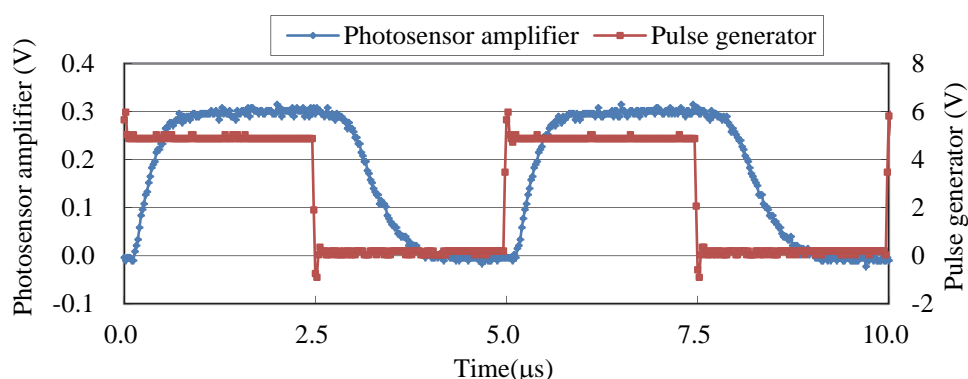


図 4.22 応答速度確認実験計測の様子

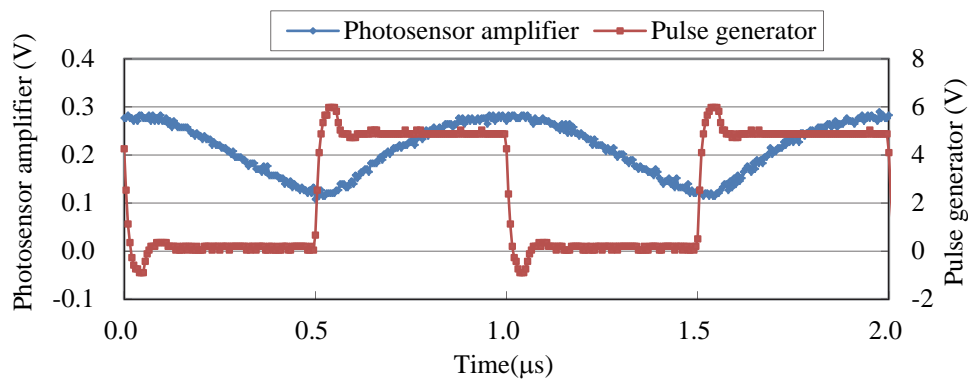
矩形波信号の周波数を 1kHz から 3MHz まで変化させて LED の点灯と消灯を繰り返し行い、その時の特性を調査した。点灯と消灯はそれぞれ周期の 50%とした。図 4.23(a)から(c)にフォトセンサーアンプから出力された電圧と矩形波信号の電圧をプロットしたグラフを示す。その時の周波数は 1kHz, 200kHz, 1MHz である。また図 4.24 に 1kHz から 3MHz まで変化した輝度の振幅特性を示す。



(a) 1kHz



(b) 200kHz



(c) 1MHz

図 4.23 応答速度の結果

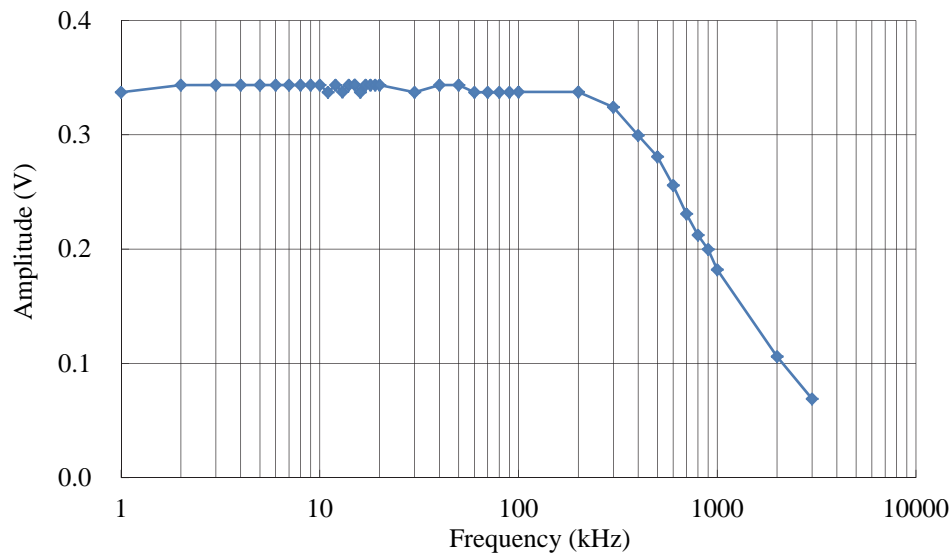


図 4.24 入力信号 1kHz とフォトセンサーアンプから得られた振幅

フォトセンサーアンプから出力された電圧より、本格子投影装置の点灯時の立ち上がり時間は $0.6\mu\text{s}$ で、消灯時の立下り時間は $1.5\mu\text{s}$ であった。200kHz までは、消灯時間中にフォトセンサーアンプの出力信号が立下りきっている。1MHz になると消灯時間中に立下りきらないため消灯できていない。そのためフォトセンサーアンプからの出力は 0V になっていない。また、立ち上がり時間もかかるため山まで上がりきっていない。そのため、振幅値は大きく下がった。使用したフォトセンサーアンプの応答速度は 100MHz つまり $1.0 \times 10^{-5}\text{ms}$ の応答速度であり $4.0 \times 10^{-5}\text{ms}$ ステップ光の出力も測定できている。そのため、フォトセンサーアンプの応答速度が原因で、1MHz である $1.0 \times 10^{-3}\text{ms}$ の周期で点灯消灯される LED の波形がなまるとは考えられない。また、LED 素子の一般的な応答速度は、 $5.0 \times 10^{-5}\text{ms}$ から $1.0 \times 10^{-4}\text{ms}$ と言われており今回の実験では大きく影響を与えなかったと考えられる。LED の駆動回路に用いているトランジスタ 2SC2240 の同タイプのトランジスタでは、立ち上がり時間は $1.0 \times 10^{-4}\text{ms}$ から $1.0 \times 10^{-3}\text{ms}$ であり、立下り時間は $1.0 \times 10^{-4}\text{ms}$ から $1.0 \times 10^{-3}\text{ms}$ である。フォトセンサーアンプや LED の応答速度と比較すると遅い。そのため、計測した振幅値が 300kHz から下がっている原因は、トランジスタ 2SC2240 の応答性能が大きく影響していると考えられる。駆動回路の応答性能を高くすることで、LED 素子の応答速度まで位相シフトを行うことができるようになる。振幅特性を示した図 4.23(b)では 200kHz までは振幅に変化がないことを示している。そのため、この動作回路と高密度複数ライン LED デバイスを用いた場合、格子のシフト速度は 200kHz までは問題なく使用することができ、高速計測に支障はきたさないと考えられる。

4-7 リアルタイム三次元計測

高密度複数ラインLED格子投影装置の光量を上げるために図4.6のLEDドライバーの電流を最大20mAから最大80mAまでに出力できるように改良をした．これを用いて図4.25の試作機を作成した．この装置を用いて、深さ0.1mmの彫り込み文字を加工した白樹脂板とその上に置かれた高さ約3mmの顔模型成型品を計測試料として水平方向に移動させながら80fpsのリアルタイムで三次元計測を行った．計測試料の写真と計測結果をそれぞれ図4.26(a)と(b)に示す．掘り込みの浅い文字も、高さのある顔模型成型品も形状を捉えることができてい

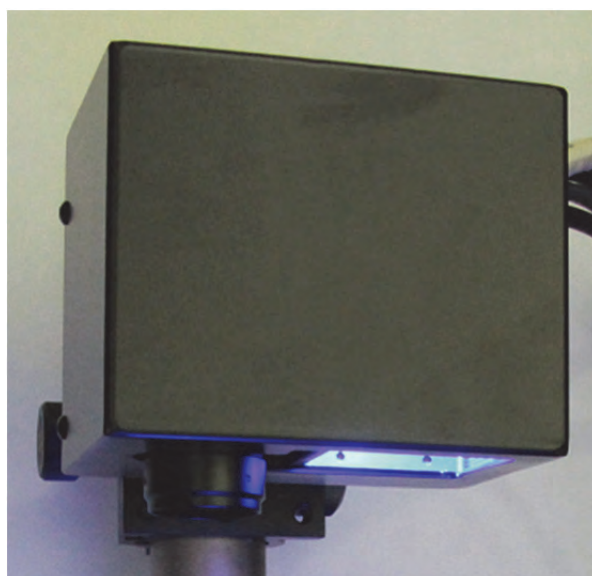
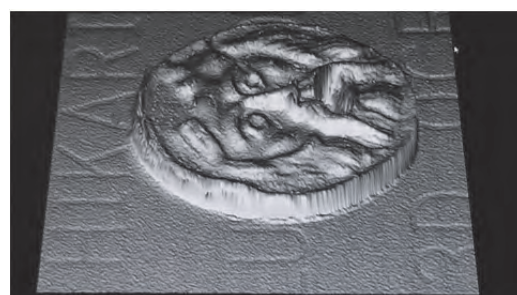


図4.25 高密度複数ラインLED格子投影装置を用いた三次元計測装置の写真



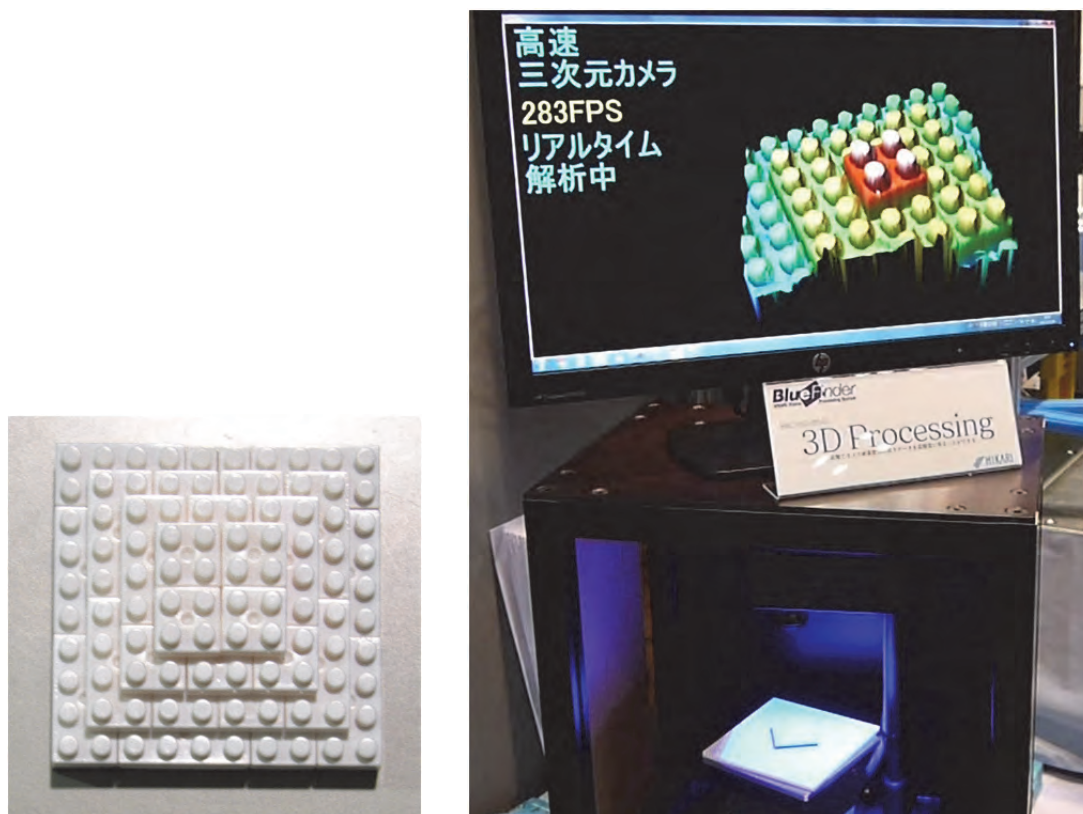
(a) 計測対象の写真



(b) 移動させながら計測した結果

図4.26 彫り込み文字加工した白樹脂板と顔模型成型品の計測対象と結果

さらに, 高輝度複数ラインLED格子投影装置を用いてリアルタイムで三次元計測を行った. 計測対象である樹脂製のブロックと, リアルタイムで三次元計測を行っている様子の写真を図4.27(a)と(b)にそれぞれ示す. ブロックを水平面内で回転させながら計測を行った. このときのカメラの画素数は256pixel×256pixelで, 露光時間は0.8msである. 水平面内を回転する対象物を280Hzで位相シフトしながら280fpsのリアルタイムで三次元計測を行った. ブロックの凹凸の高さを捉えることができる.



(a) 計測対象の樹脂ブロック写真 (b) リアルタイムで三次元計測を行っている様子

図4.27 樹脂ブロックの計測対象とリアルタイム計測

4-8 おわりに

本章では、実用化のために専用設計した2種類の複数ラインLEDデバイスの開発を行った。一つ目は、LED素子を高密度に実装して開発した高密度複数ラインLEDデバイスである。このLEDデバイスを使用した格子投影装置の開発を行った。本投影装置の寸法は55mm×59mm×65mmで、重さは240gであり、FA分野に用いるために十分小型・軽量である。また、この格子投影装置を用いて平面試料の三次元計測を行った。その結果、位相シフト6回で高さ計測レンジ8mmに対して平均誤差0.005mm以下、標準偏差0.013mm以下で高精度に三次元計測を行うことができた。また、本格子投影装置の位相シフト機構の応答速度を調査した結果、200kHzまで位相シフトが可能であることを確かめることができた。FA分野においては、十分高速に位相シフトを行うことができています。二つ目は、高密度複数ラインLEDから光量不足を解決するため、高輝度なLED素子を用いて開発した高輝度複数ラインLEDデバイスである。本LEDデバイスを用いて開発した格子投影装置の寸法は77mm×92mm×69mmで、重さは450gであり、FA分野に用いるためには十分小型・軽量化されている。本格子投影装置を用いて平面試料の三次元計測を行った。その結果、高さ計測レンジ25mmに対して平均誤差0.003mm以下、標準偏差0.033mm以下の精度が得られた。高密度複数ラインLED格子投影装置と比較すると高輝度複数ラインLED格子投影装置は標準偏差の値が大きい。これは、ラインLED間のピッチが高輝度複数ラインLEDデバイスのほうが大きいため、投影する格子のピッチも大きく高さ方向の計測レンジが広いためである。標準偏差を計測レンジで割った単位計測レンジあたりの標準偏差では、高密度複数ラインLED格子投影装置は0.0016 mm/mmで、高輝度複数ラインLED格子投影装置は0.0013mm/mmであり、同等の精度であるといえる。

また、対象物を移動させながら三次元計測を行った。高密度複数ラインLED格子投影装置では80fpsで、高輝度複数ラインLED格子投影装置では280fpsのリアルタイムで三次元計測を行うことができた。用いたカメラのフレームレートがネックとなり1msでの三次元計測を行うことはできなかったが、位相シフトを200kHzで行うことができるため高速度カメラを撮影に用いることで高速に三次元計測を行うことができる。高速度カメラと複数ラインLED格子投影装置を組み合わせた三次元計測として12kHzで位相シフトを行い、4kfpsで三次元計測を行った報告[32]がなされている。これらにより、対象物を停止させることなく三次元計測を行うことが可能なため、ベルトコンベア上を停止することなく移動している対象物などの三次元計測ができるようになる。その結果、生産性の向上が見込まれると考えられる。ただし、ガラス格子のピッチよりLEDの発光面は小さくなければならないため、光量を上げることが難しい。さらに、高速な用途に用いる場合、光量が問題になる。

5. 複数光路格子投影装置の開発

5-1 はじめに

FA 分野においては、設備の立ち上げやメンテナンスでも高速な三次元計測を用いることが必要とされている。例えば、塗布剤を塗布している様子の三次元計測を行い、その結果から塗布剤の形状変化を観察する用途である。塗布剤の塗布量だけでなく、塗布剤の形状は、製品の品質に影響をおよぼすため重要である。塗布剤の形状は、塗布された量だけでなく、塗布する位置や速度、塗布剤を硬化させるために紫外線などを照射させるタイミングでも変化する。塗布剤の形状変化を三次元的に可視化して観察することで、塗布する位置や速度、塗布剤の量や温度、硬化を開始させるタイミングなどのパラメーター調整にかかる時間が短縮される。塗布剤によっては、形状の変化が高速なため、二次元画像を用いた観察では高速度カメラが用いられている。高速度カメラを用いた位相シフト法による格子投影型三次元計測として、DMDや複数ラインLEDを用いた研究[23][32]が行われている。微小なミラーが二次元状にならべられた DMD は、ミラーの傾きを高速に切り替えることで投影パターンを形成する。DMD を投影装置に用いることにより 2kHz で位相シフトを行い 667Hz で形状計測が行われた例が報告されている。ただし、ミラーの応答周波数が位相シフト速度になり、機械的な動作のため切り替え速度には限界がある。第 4 章で述べた複数ライン LED の場合は、LED の点灯位置を切り替えることによってガラス格子の影が投影される位置を移動させているので、LED の点灯／消灯の切り替え速度が位相シフト速度になる。機械的な部分がないため高速な位相シフトを行うことができる。ただし、ガラス格子のピッチより LED の発光面は小さくなければならないため、光量を上げることが難しい。高速な用途に用いる場合、光量が問題になる。

一方、高速に変位計測を行う手法として、プリズムを複数個用いた干渉縞の位相シフト手法が提案されている[70]。プリズムと偏光板、カメラを 3 組用いることで、偏光板の角度によって位相シフトされた干渉縞がそれらのカメラで撮影される光学系である。カメラを 3 台用いることで、同時に位相がシフトされた 3 枚の画像を得ることができる。

これらの先行研究を踏まえ、本章では、光学系によって像面の光路を複数に分割して格子を投影する手法を提案する。5-2 節では、提案する格子投影手法の説明を行う。5-3 節では、本手法を用いた投影装置の開発を行い、その特徴を述べる。5-4 節では、位相シフト機構の応答速度を評価して高速性を確認する。5-5 節では、この投影装置と高速度カメラを用いた三次元計測装置を構築し、平面試料を用いて精度の評価を行う。5-6 節では、全空間テーブル化手法で用いる基準面に液面を用いることで、平面度のよい計測が行えることを確認する。5-7 節では、動的物体の三次元計測を行う。5-8 節では、本章のまとめを記す。

5-2 複数光路格子投影手法

複数光路格子投影手法のしくみを図 5.1 に示す．以下に原理を説明する．ハーフミラーA から C を用いて，投影レンズの像面側の光路を複数光路に分けている．そのうち 3 光路を使用している．一つ目は LED1 の光がハーフミラーA と B を透過する光路，二つ目は LED2 の光がハーフミラーA で反射しハーフミラーB を透過する光路，三つ目は LED3 の光がハーフミラーC を透過しハーフミラーB で反射する光路である．また，各光路の投影レンズ像面位置に格子ピッチの $1/3$ ずつずらしてガラス格子を配置している．そのため，LED を順次点灯することで， $2\pi/3$ ずつ位相シフトした格子が投影される．ハーフミラーC は LED3 の光量を LED1 と LED2 と一致させるために用いられている．本手法は，電氣的に LED の点灯位置を切り替えることで位相シフトされるため，高速な位相シフトを行うことができる．また，面発光の LED を用いることができるため光量を比較的簡単に上げることができる．

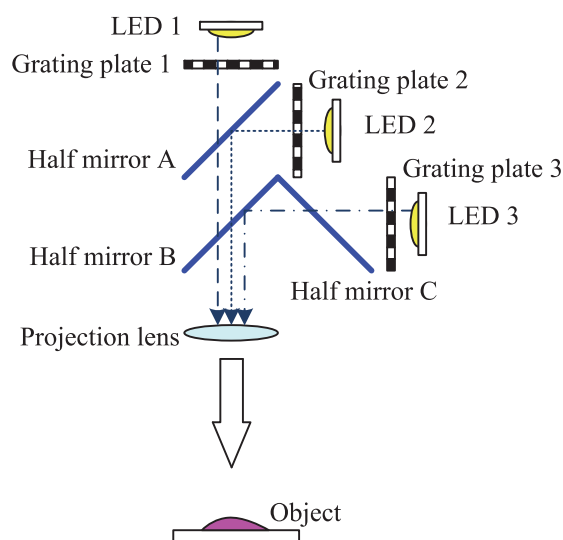


図 5.1 複数光路格子投影手法のしくみ

5-3 複数光路格子投影装置

複数光路格子投影手法を用いた格子投影装置の開発を行った。その格子投影装置の外観写真を図 5.2 に示す。光源である LED には、シチズン電子の CL-L251-MC4N1-C (4W)を用いている。ガラス格子は格子ピッチ 0.5mm のものを、ハーフミラーはプリズムを用いた。各 LED は、それぞれの LED コントローラーの駆動回路によって定電流制御されている。LED コントローラーには LED の点灯／消灯を制御する外部入力があり、投影コントローラーの出力が接続されている。投影コントローラーは、USB で PC と接続されており、出力の周期や On/Off の時間を設定することができる。本格子投影装置の寸法は 70mm×70mm×35mm で、重さは 170g であり、FA 分野に用いるために十分小型・軽量化がなされている。

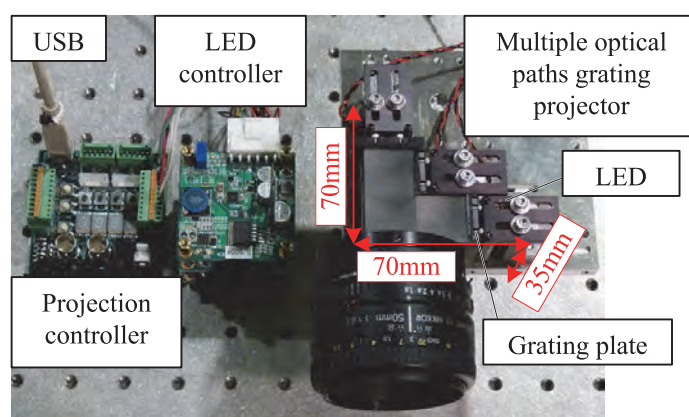


図 5.2 試作した複数光路格子投影装置の写真

5-4 位相シフト機構の応答速度評価

本格子投影装置の位相シフト機構の応答速度の評価を行った。実験システムを図 5.3 に示す。投影レンズをとりはずし、その位置にフォトダイオードを設置して、周期的に LED を順次点灯させたときのフォトセンサーアンプの出力電圧を計測した。点灯時間は、1 周期の 80%とした。光検出器に浜松フォトニクス社製の PIN フォトダイオード S3071 とフォトセンサーアンプ C8366 を用いた。これらの応答周波数は 40MHz である。フォトセンサーアンプの出力と、投影コントローラーから各 LED コントローラーへの出力をそれぞれオシロスコープで取得している。点灯周波数を 10kHz, 100kHz, 1MHz に設定したときの結果をそれぞれ図 5.4(a), (b), (c)に示す。ここで、LED コントローラーは、投影コントローラーからの入力信号が 0.8V 以下のとき LED を点灯し、2V 以上のとき LED を消灯する。図 5.4(c)に示すように、点灯周波数が 1MHz の場合、 $0.8\mu\text{s}$ から $1.0\mu\text{s}$ の間でフォトセンサーアンプの出力電圧は 0V になっていない。これは、LED2 の点灯開始時までに LED1 が完全に消灯していないためである。この状態では、LED1 と LED2 の格子が重なって投影されるため、三次元計測に適した投影ができているとは言えない。

また、図 5.5 に点灯周波数を 1kHz から 3.3MHz まで変化させたときに得られたフォトセンサーアンプの出力電圧の振幅を示す。これより 700kHz 以上で振幅が減少していることがわかる。これは、先に述べたように点灯していた LED が完全に消灯しきれていない状態で次の LED が点灯開始するためである。600kHz 以下においては振幅が変化していないため、信号の切り替えによって、投影格子の位相シフトが行われているといえる。そのため、本研究で試作した格子投影装置の場合は、600kHz までは問題なく三次元計測に使用できる。本格子投影装置に用いた LED の駆動回路は、第 4 章の複数ライン LED 格子投影装置に用いたものから改善しているため、より高速に位相シフトを行うことができる結果が得られている。

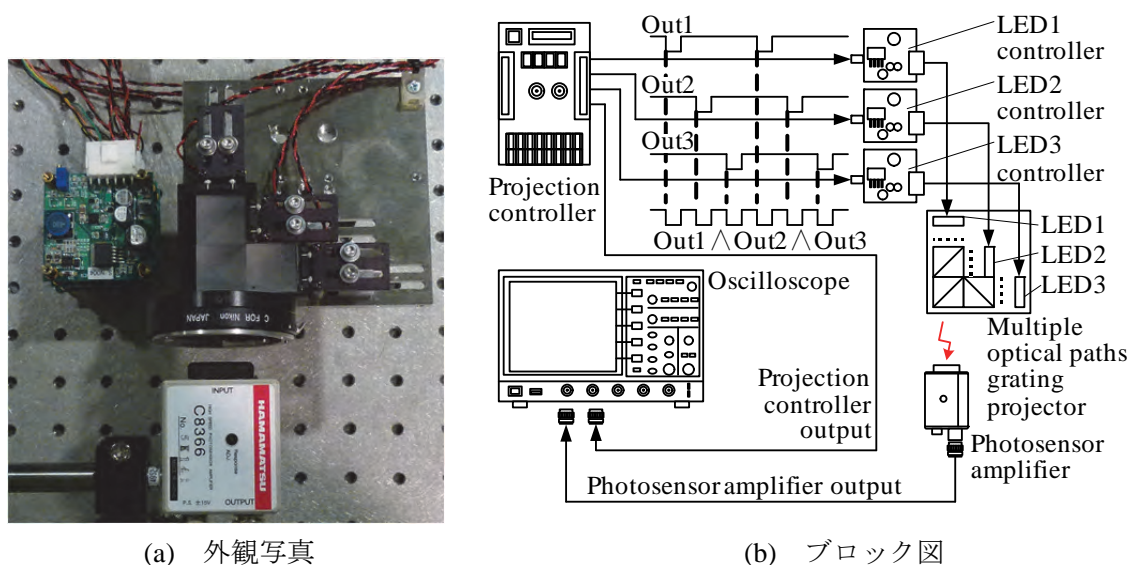
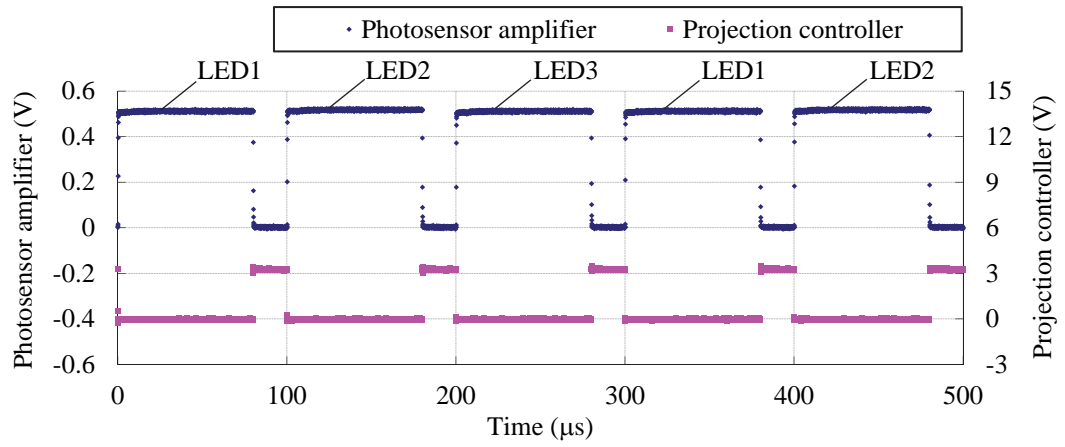
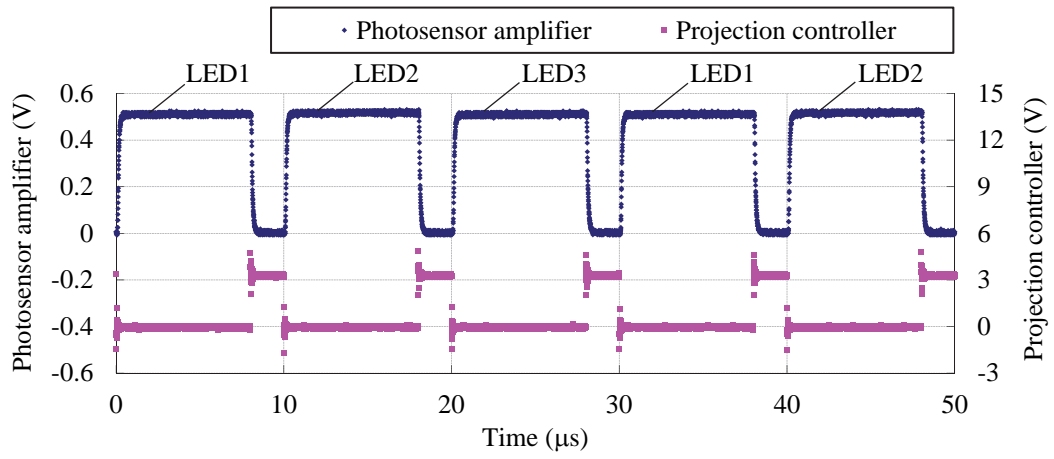


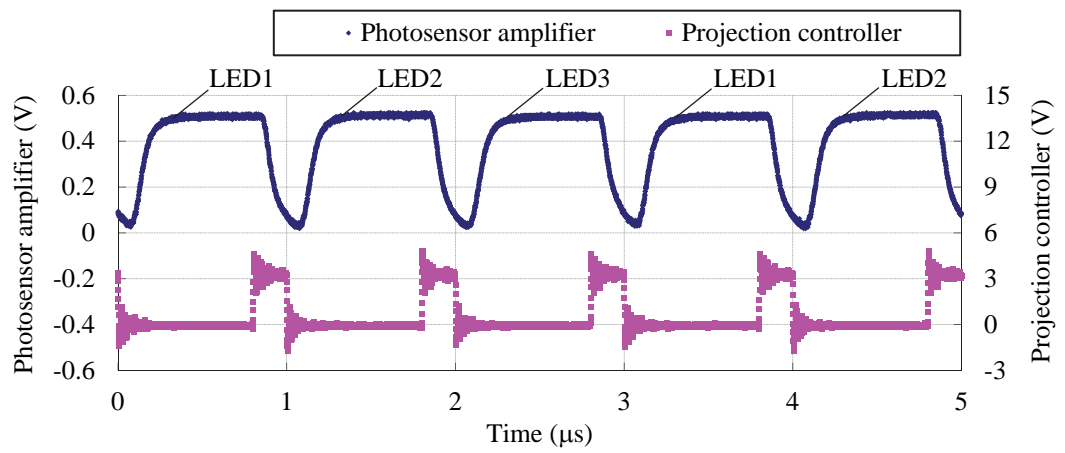
図 5.3 応答速度評価実験装置



(a) 10kHz



(b) 100kHz



(c) 1MHz

図 5.4 応答速度の結果

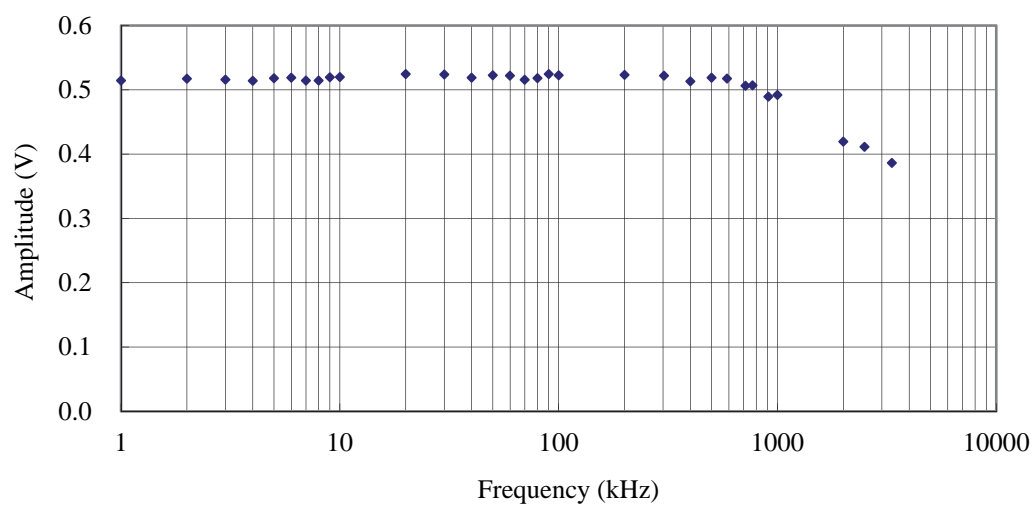


図 5.5 振幅特性の結果

5-5 静止物体による精度評価

本投影装置と Vision Research 社の高速度カメラ Phantom Miro M310 を組み合わせて、三次元計測装置システムを構築した。その構成図を図 5.6 に示す。この高速度カメラは、撮影した画像を高速に記録する内蔵メモリを持っており、撮影画素数により撮影の速度と枚数が決定する。撮影画像の読み出しは、撮影終了後イーサネットを経由して行われる。

まず、動物的物体の三次元計測を行う前に静止物体に対して計測を行い、精度を確認した。位相シフトの速度を 30kHz として、投影コントローラーからカメラトリガ信号を出力することで、カメラを投影装置に同期させて撮影を行った。カメラの画素数は 320pixel×240pixel、露光時間は 27 μ s である。この条件で、全空間テーブル化手法を用いてキャリブレーションを行った。基準面の z 軸方向の移動には繰返し位置決め精度 $\pm 0.2\mu\text{m}$ の自動 Z ステージを用いた。基準面枚数は、0mm から 11mm まで 0.5mm 間隔の 23 枚とした。その後、基準面を平面試料として用いた精度確認実験を行った。

まず、基準面をキャリブレーションの際とは異なる位置として、8.2mm の位置で計測を行った。その撮影画像と位相分布、高さ分布、1 ラインの高さ分布をそれぞれ図 5.7(a)から (d) に示す。次に、2.2mm から 10.2mm まで 2mm ピッチで移動させ計測を行った。その時の撮像中心の横 1 ラインの高さ分布を図 5.8 に示す。この横 1 ラインの高さ分布を用いて平均と実際の位置との誤差、標準偏差を求めた結果を表 5.1 に示す。これらより、高さ計測レンジ 11mm に対して、計測誤差 0.023mm、標準偏差 0.038mm で計測することができた。

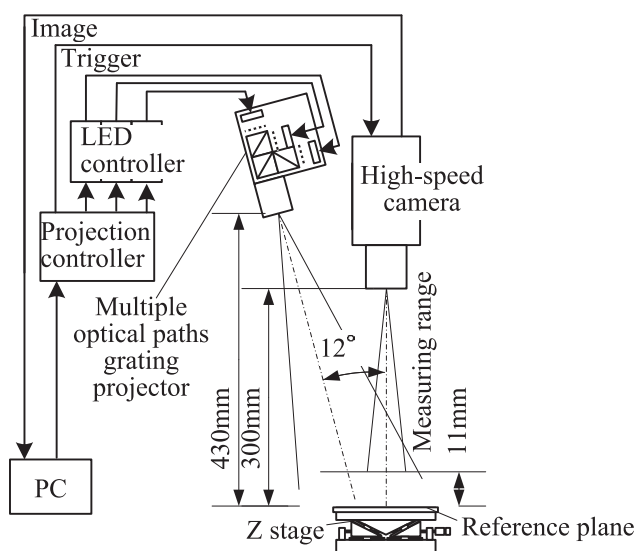
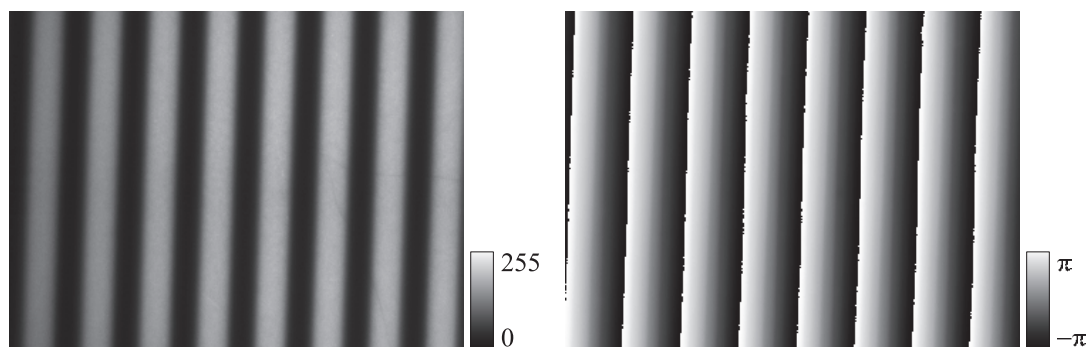
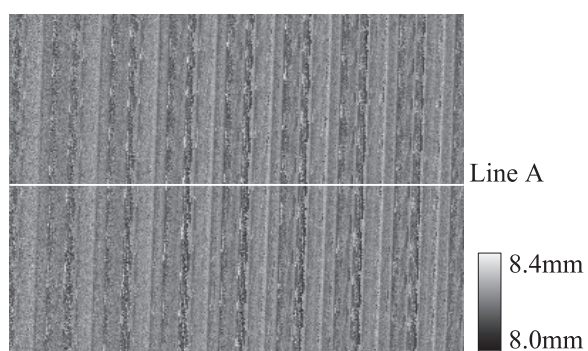


図 5.6 高速度カメラを用いた三次元計測装置の構成図

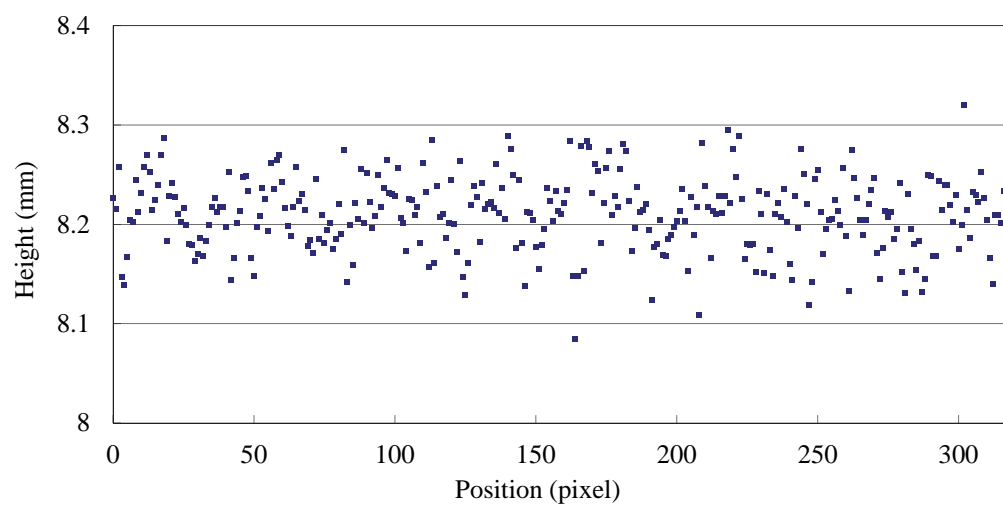


(a) 格子画像

(b) 位相分布



(c) 高さ分布



(d) 図 5.7(c)のライン A の高さ分布

図 5.7 8.2mm の位置に移動した基準面を計測した結果

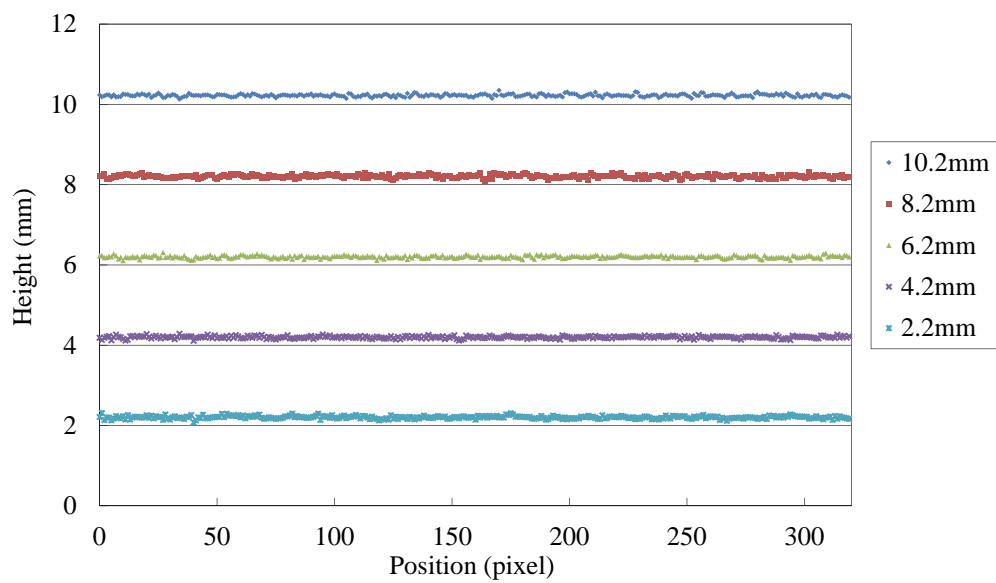


図 5.8 基準面の高さ分布

表 5.1 基準面を計測した結果

Given height	2.200	4.200	6.200	8.200	10.200
Measured height					
Average	2.205	4.199	6.205	8.210	10.223
Error	0.005	-0.001	0.005	0.010	0.023
Standard deviation	0.034	0.029	0.031	0.038	0.032

Unit [mm]

5-6 液面を基準面とした全空間テーブル化手法の精度評価

高精度に計測を行うために、得られた投影格子の位相から三次元座標に精度よく変換することが可能なキャリブレーションとして、全空間テーブル化手法が提案されている。このとき用いる基準面の平面度は、計測精度を決める重要な要因の一つである。そこで本節では、加工した平面と比べると平面度のよい液面を全空間テーブル化手法に用いる基準面に適用して計測精度の評価を行う。

まず、複数光路格子投影装置とアイジュール社のカメラ ID4MB-CLD を組み合わせて、三次元計測装置システムを構築した。カメラの画素数は $512\text{pixel} \times 384\text{pixel}$ 、露光時間は 1ms とする。計測装置の写真とシステム構成を図 5.9(a), (b) にそれぞれ示す。本投影装置は、2 値のガラス格子をデフォーカスさせて用いるため、投影される格子の輝度分布は正確な正弦波状とはならない。しかし、全空間テーブル化手法を用いるため、その影響は出ない。基準面に液面を用いて基準面枚数を 20 枚、基準面の間隔を 0.5mm として全空間テーブル化手法によるキャリブレーションを行った。これによって、高さ計測レンジは 9.5mm となる。その後、基準面を平面試料として用いた精度確認実験を行った。基準面をキャリブレーションの際とは異なる位置として、 0.7mm から 8.7mm まで 2mm ピッチで移動させ、その時の全画素を用いて高さの平均と誤差、標準偏差を求めた。その結果を表 5.2 に示し、撮影画像と位相分布、高さ分布、撮影中心の横 1 ラインの高さ分布をそれぞれ図 5.10(a) から (d) に示す。その結果、高さ計測レンジ 9.5mm に対して、計測誤差 0.004mm 、標準偏差 0.051mm で計測することができた。

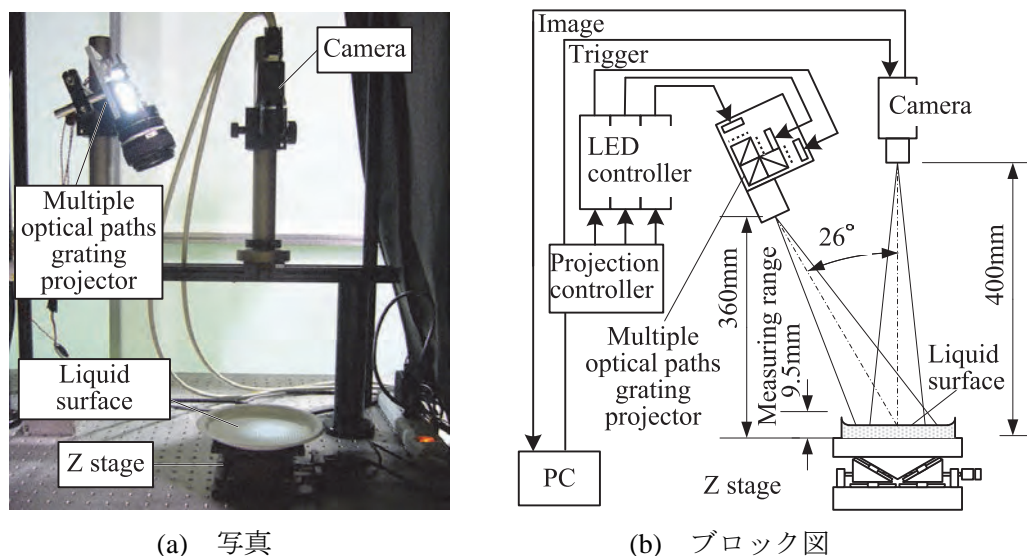
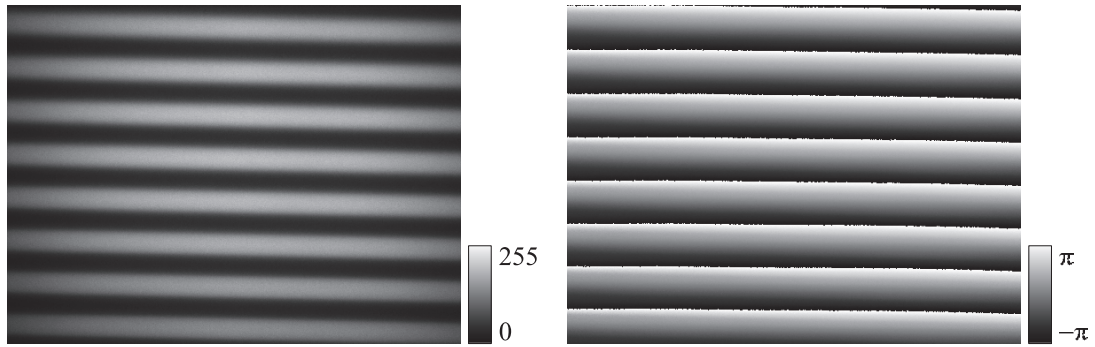


図 5.9 実験システム

表 5.2 基準面の計測結果

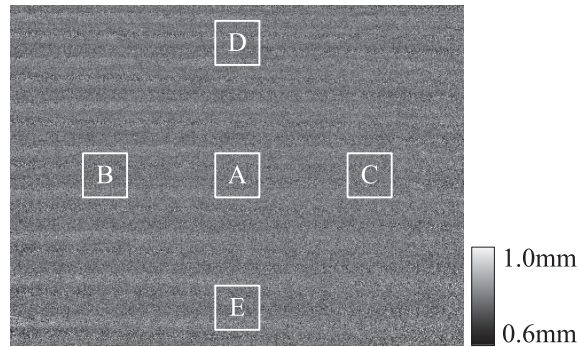
Given height	0.700	2.700	4.700	6.700	8.700
Measured height					
Average	0.704	2.703	4.703	6.701	8.703
Error	0.004	0.003	0.003	0.001	0.003
Standard deviation	0.049	0.049	0.050	0.051	0.051

Unit [mm]

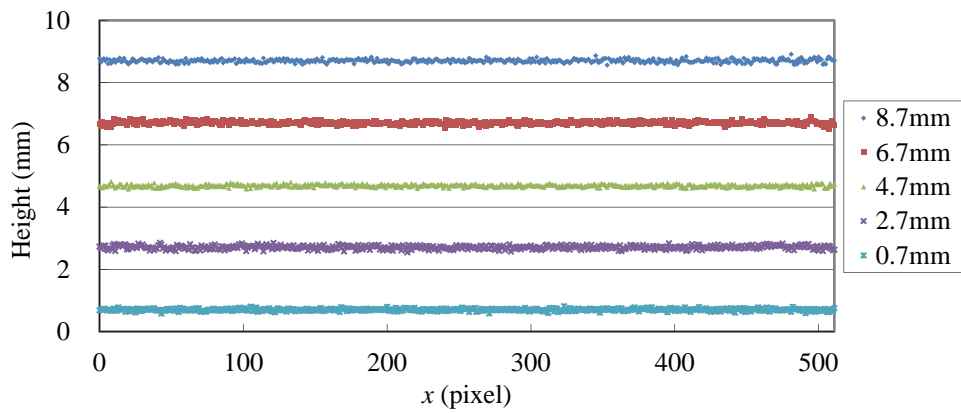


(a) 格子画像

(b) 位相分布



(c) 高さ分布



(d) 基準面の高さを変更したときの高さ分布

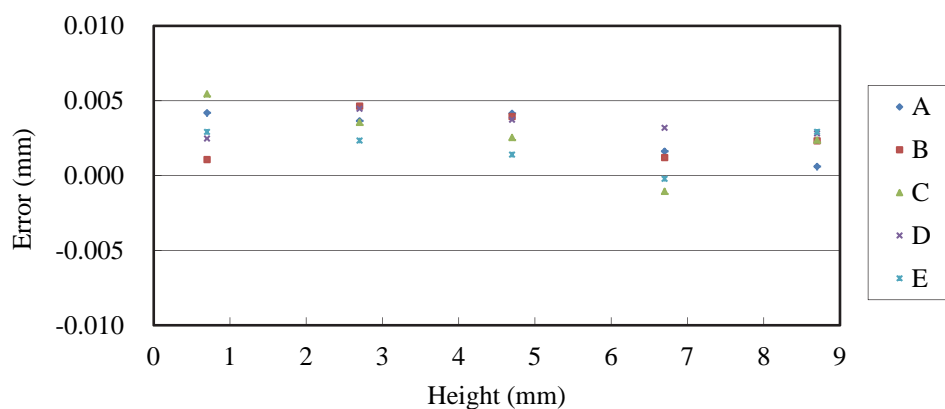
図 5.10 基準面の高さ計測結果

また, 図 5.10(c)に示す A から E の 5 箇所の異なる位置で 50pixel×50pixel の範囲を平均した高さと試料高さの誤差の最大と最小, 最大と最小の差を表 5.3 に示す. それぞれの箇所における誤差と標準偏差を図 5.11(a), (b)に示す. その結果, 高さ計測レンジ 9.5mm に対して, 平均の最大と最小の差 0.004mm で計測することができた.

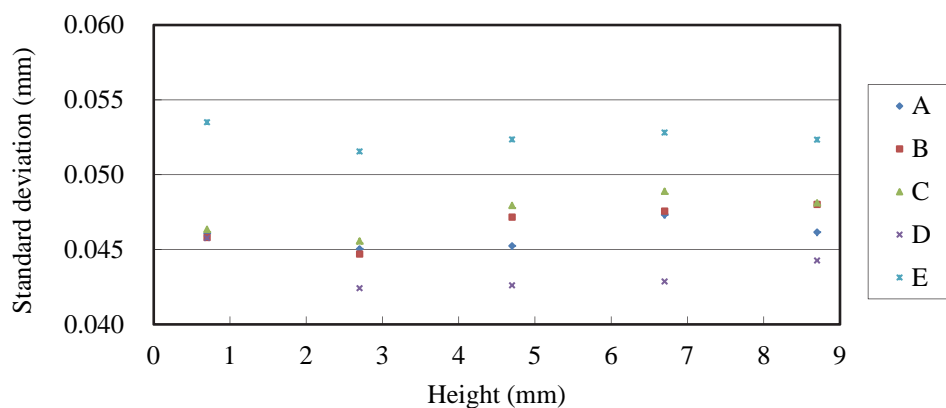
表 5.3 5 箇所の異なる位置の計測結果

Given height	0.700	2.700	4.700	6.700	8.700
Measured height					
Max	0.005 (C)	0.005 (B)	0.004 (A)	0.003 (D)	0.003 (E)
Min	0.001 (B)	0.002 (E)	0.001 (E)	-0.001 (C)	0.001 (A)
Range	0.004	0.003	0.003	0.004	0.002

Unit [mm]



(a) 誤差

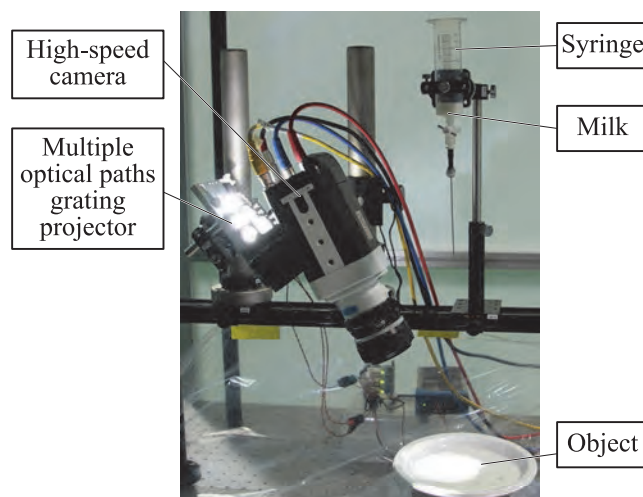


(b) 標準偏差

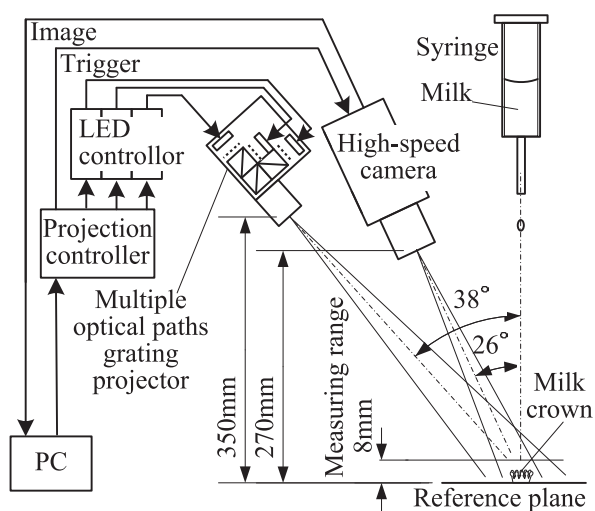
図 5.11 5 箇所の異なる位置の誤差と標準偏差

5-7 動的物体の三次元計測

動的物体への適用として、ミルククラウンの三次元計測を行った。計測装置の写真とシステム構成を図 5.12(a), (b)にそれぞれ示す。ここでは、位相シフト速度 15kHz で撮影を行った。カメラの画素数は 512pixel×384pixel, 露光時間は 65 μ s とする。1/15000s 毎の撮影画像を図 5.13 に示す。また、1/500s 毎に求めた高さ分布を図 5.14 に示す。ミルククラウンを形成する様子が計測されているのがわかる。さらに、5/500s を起点にして 1/5000s 毎に求めた高さ分布を図 5.15 に示す。図 5.16 に、図 5.15(a)に示すライン A 上の図 5.15(a)から(c)までの高さ分布を示す。ミルククラウンの高さが徐々に高くなっている様子が 1/5000s 毎に計測されているのがわかる。



(a) 写真



(b) システム構成図

図 5.12 実験システム



(a) 0s

(b) 1/15000s

(c) 2/15000s

図 5.13 格子画像



(a) 0s

(b) 1/500s

(c) 2/500s



(d) 3/500s

(e) 4/500s

(f) 5/500s



(g) 6/500s

(h) 7/500s

(i) 8/500s

図 5.14 1/500s 毎のミルククラウンを計測した結果

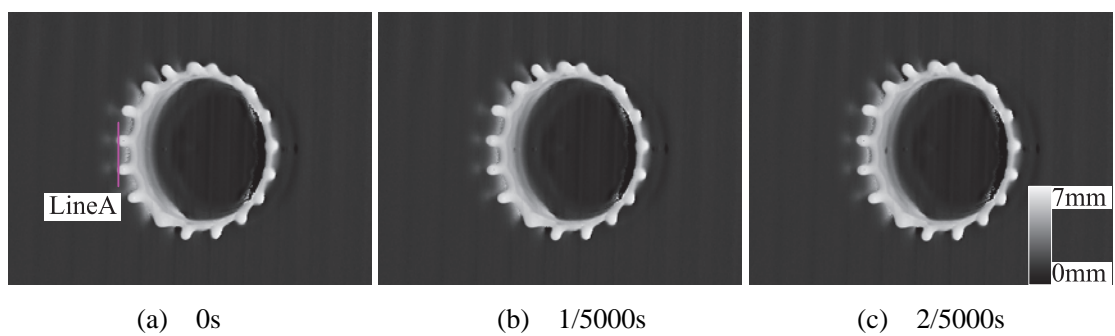


図 5.15 図 5.14 の 5/500s を起点として 1/5000s 毎にミルククラウンを計測した結果

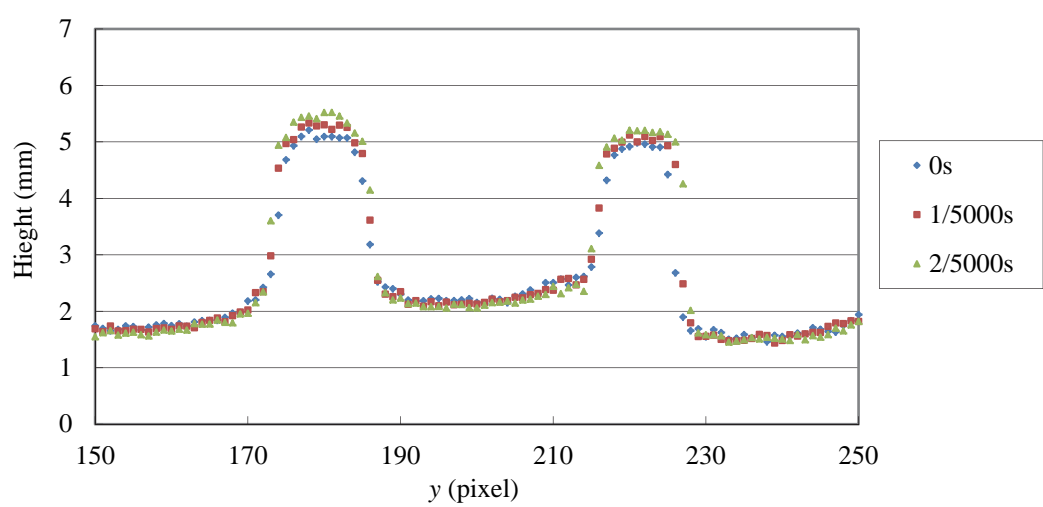
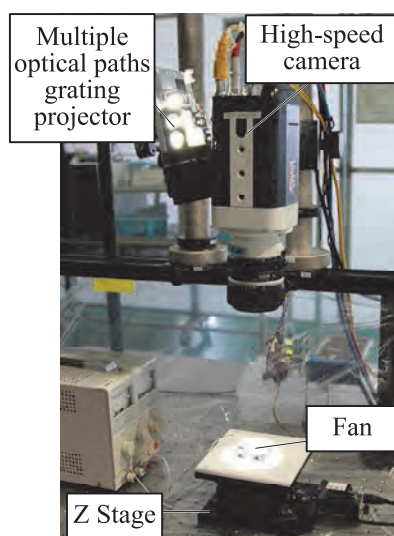
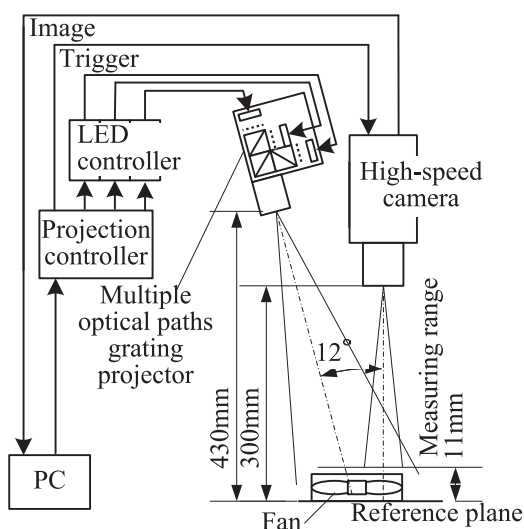


図 5.16 図 5.15(a)のライン A 上の高さ分布

次に、回転するファンの三次元計測を行った。計測時の写真とシステム構成、ファンの外観写真を図 5.17(a), (b), (c)にそれぞれ示す。ファンの大きさは $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 10\text{mm}$ で、回転速度は 4300rpm である。ここでは、位相シフト速度 30kHz で撮影を行った。カメラの画素数は $320\text{pixel}\times 240\text{pixel}$ 、露光時間は $27\mu\text{s}$ とする。 $1/30000\text{s}$ 毎の撮影画像を図 5.18 に示す。 $1/10000\text{s}$ 毎に求めた高さ分布を図 5.19 に示す。図 5.20 に図 5.19(a)のライン A 上の高さ分布を示す。羽根の端面部分にノイズが出ているが、ファンの回転している様子が $1/10000\text{s}$ 毎に計測されているのがわかる。



(a) 写真

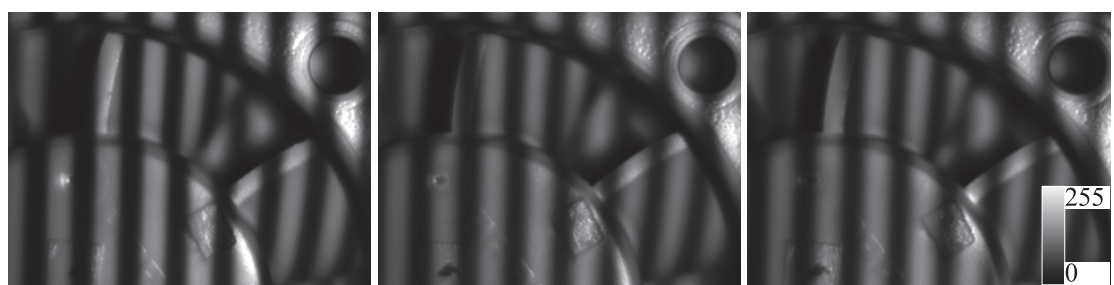


(b) システム構成図



(c) ファンの写真

図 5.17 実験システム



(a) 0s

(b) 1/30000s

(c) 2/30000s

図 5.18 ファンの格子画像



(a) 0s

(b) 1/10000s

(c) 2/10000s



(d) 3/10000s

(e) 4/10000s

(f) 5/10000s



(g) 6/10000s

(h) 7/10000s

(i) 8/10000s

図 5.19 1/10000s 毎に計測したファンの高さ分布

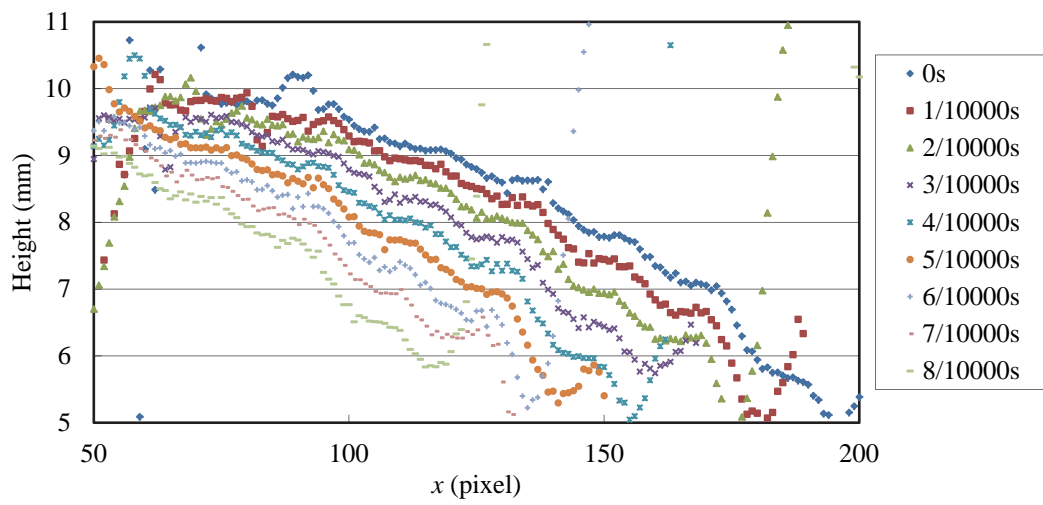


図 5.20 5.19(a)のライン A 上の高さ分布

5-8 おわりに

本章では、高速な位相シフトが可能な複数光路格子投影手法を提案した。その手法を用いた格子投影装置の開発を行い、600kHz まで位相シフトが可能なことを確認できた。この格子投影装置の寸法は 70mm×70mm×35mm で、重さは 170g であるため、FA 分野に用いるために十分小型・軽量である。さらに、この格子投影装置と高速度カメラを用いて三次元計測装置の構築を行い、高速に三次元計測ができることの確認を行った。まず、この装置を用いて、静止している平面試料の計測を行うことで精度を検証した。その結果、高さ計測レンジ 11mm に対して、計測誤差 0.023mm、標準偏差 0.038mm で計測することができた。次に、動的物体として、ミルククラウンと回転するファンの三次元計測を行った。ミルククラウンの場合は、15kHz で位相シフトを行い 5kHz で三次元計測を行った。回転するファンの場合は、30kHz で位相シフトを行い 10kHz で三次元計測を行った。その結果、動的物体でも形状を取得することが可能であることを示すことができた。そのため、本投影手法は、液体など形状の変化が高速な対象物の三次元計測にも用いることが可能であるといえる。

また、本投影手法は面発光の LED を用いることができるため、比較的簡単に光量をあげることができる。そのため、さらに高速な用途の三次元計測にも本格子投影手法を用いることが可能である。

6. サンプルングモアレカメラの開発

6-1 はじめに

FA における調整工程では、振動計測をリアルタイムで行いたい用途がある。例えば、モーターを用いた製品では、歯車同士の隙間の大きさによって振動が起こるため、その振動を抑制するために歯車同士の隙間の調整を行う用途がある。このような用途では、リアルタイムで振動数計測を行いながら歯車同士の隙間の調整を行うことが要求されている。このようなリアルタイムで三次元計測を行うことが必要とされている用途に、位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測を適用するためには、高速な格子の位相シフト機構を持つ格子投影装置だけでなく、位相シフトされた格子画像を用いて位相解析を行い三次元データに変換する処理を高速に行う必要がある。第 2 章で述べたサンプルングモアレ法は 1 枚の格子画像から複数枚の位相シフトされたモアレ画像を生成し位相解析を行うことが可能である。投影格子は位相シフトさせる必要がないため、位相シフト機構が不要である。しかし、サンプルングモアレ法は演算量が多いため、高い能力の処理装置が必要である。そのため、FPGA を用いてリアルタイムでサンプルングモアレ法を処理することができるサンプルングモアレカメラ[36]の開発が行われている。しかし、FA 向けとしては十分に高速で小型・軽量ではない。

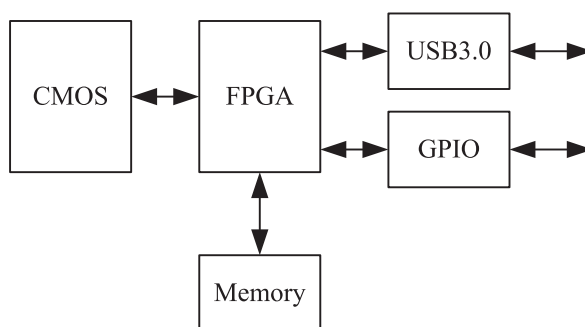
そこで本章では、FA で用いることができるように、高速化した小型・軽量のサンプルングモアレカメラを開発する。モアレの位相分布から高さ分布への変換は、全空間テーブル化手法のテーブル化にモアレの位相分布を用いて行っておくことで、出力されたモアレの位相分布からテーブルを参照するだけで高さ分布に変換できるため高速である。6-2 節では、サンプルングモアレカメラについて述べる。6-3 節では、サンプルングモアレカメラを用いた三次元計測装置を構築して、平面試料を計測した結果について述べる。6-4 節では位相シフト法とサンプルングモアレ法の計測精度の比較を行う。6-5 節では、振動する対象物をリアルタイムで三次元計測を行うことにより、高速性の確認を行う。最後に 6-6 節に本章のまとめを記す。

6-2 サンプリングモアレカメラ

本研究で開発したサンプリングモアレカメラの外観写真とブロック図を図 6.1(a)と(b)にそれぞれ示す。サンプリングモアレカメラは、CMOS イメージセンサ(2048pixel×1024pixel), FPGA, メモリ, USB 接続部分, 電源ユニットで構成されている。本カメラは画像を撮影するだけでなく、撮影した格子画像にサンプリングモアレ法を適用してカメラ内の FPGA で位相解析を行いモアレの位相分布画像をリアルタイム出力することができる。撮影速度は撮影領域によって変わるが、全撮影領域の 2048pixel×1024pixel では、1 方向の位相分布を 60fps でリアルタイム計測できる。また、本カメラは、FA 向けに専用設計を行ったことで、小型・軽量化されており、寸法は 86mm×44mm×128mm で、重さは 720g である。本カメラには、二次元格子から x 方向と y 方向の格子画像を生成するため、平滑化数 31 まで設定可能な平滑化の機能がある。また、モアレ画像を生成するため最大 31 までのサンプリング処理と補間処理を行う機能がある。



(a) 外観写真



(b) ブロック図

図 6.1 サンプリングモアレカメラ

図 6.1(b)の FPGA ブロックの詳細を図 6.2 に示す。以下に、CMOS から出力される撮影された画像データから FPGA を介して位相データが出力されるまでの流れについて述べる。簡略化のために x 方向の位相データの処理について説明をする。図 6.2 に示す FPGA ブロックの中のサンプリングモアレ法ブロックには、CMOS からの画像データが CMOS コントローラーを介してピクセルクロック 200MHz で入力される。サンプリングモアレ法ブロックに入力された画像データは、図 6.3 に示すサンプリングモアレ法ブロックの中の y 方向平滑化と x 方向平滑化のブロックに分岐して入力される。 y 方向平滑化ブロックに入力された画像データは、 y 方向に平滑化されることにより x 方向の格子画像データとなり、 x 方向モアレ画像生成ブロックに入力される。このブロックの中には、 x 方向線形補間ブロックが 31 個用意されており、各線形補間ブロックは、サンプリングを開始する起点を 1 画素ずつ変えて、サンプリング数 31 未満の場合でもサンプリングと線形補間の処理を 31 並列に同時実行する。各線形補間ブロックからは、位相シフトされたモアレ画像が出力されて、 x 方向

位相シフト法ブロックに入力される．このブロックはフーリエ変換位相シフト法[60]の周波数1の成分である式(6.1)を用いてモアレ画像の位相を求める．ここで、 N はサンプリング数、 $I(x, y, n)$ はモアレ画像の輝度値で点 (x, y) は画像内の1点を表しており、 n はモアレ画像の番号で $(n = 0, 1, 2, \dots, 30)$ である．図 6.4 に示す、 x 方向位相シフト法ブロックに入力された各モアレ画像に対して、式(6.2)、式(6.3)によって決定される C_0, C_1, \dots, C_{30} と S_0, S_1, \dots, S_{30} の係数を各 MUL ブロックで乗算処理が同時に実行される．これらの係数は、サンプリング数以上の場合は 0 となっており、1 周期を超えたモアレ画像の成分を無効にしている．乗算処理された後、各 ADD ブロックで合算され、atan ブロックで逆正接が行われることにより、 x 方向の位相が出力される．このサンプリングモアレ法ブロックは、200MHz で動作しており、31 並列で線形補間ブロックなどを実行させることで入力される画像データと同じ速度の 200MHz で位相データを出力することができる．そのため、高速にリアルタイムでサンプリングモアレ法を行うことが可能となっている．

$$\tan \theta(x, y) = - \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I(x, y, n) \cos\left(n \frac{2\pi}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I(x, y, n) \sin\left(n \frac{2\pi}{N}\right)} \quad (6.1)$$

$$\begin{cases} C_n(x) = \cos\left(n \frac{2\pi}{N}\right) & (n < N) \\ C_n(x) = 0 & (n \geq N) \end{cases} \quad (6.2)$$

$$\begin{cases} S_n(x) = \sin\left(n \frac{2\pi}{N}\right) & (n < N) \\ S_n(x) = 0 & (n \geq N) \end{cases} \quad (6.3)$$

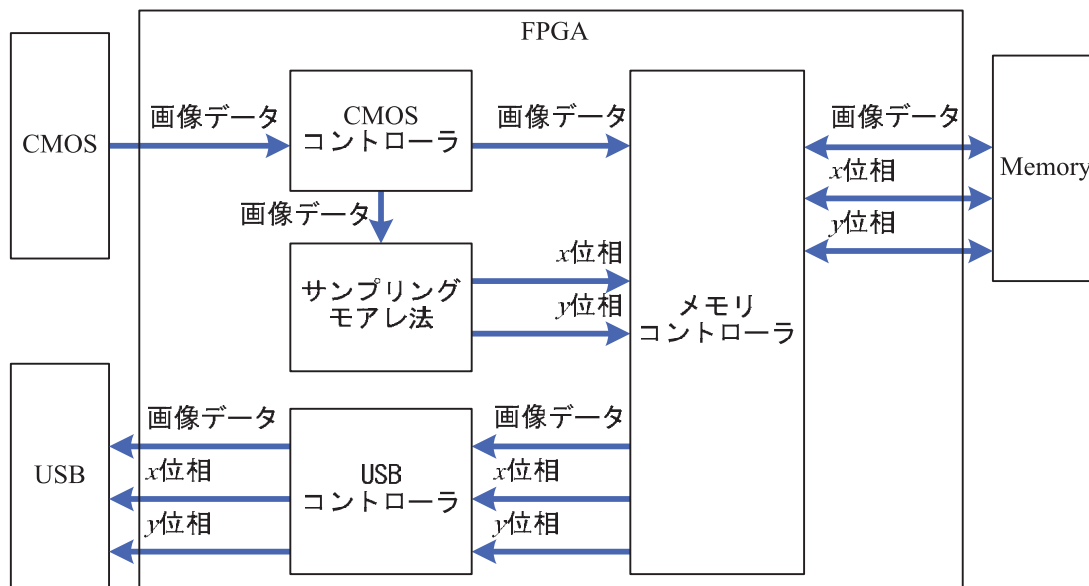


図 6.2 FPGA ブロック詳細

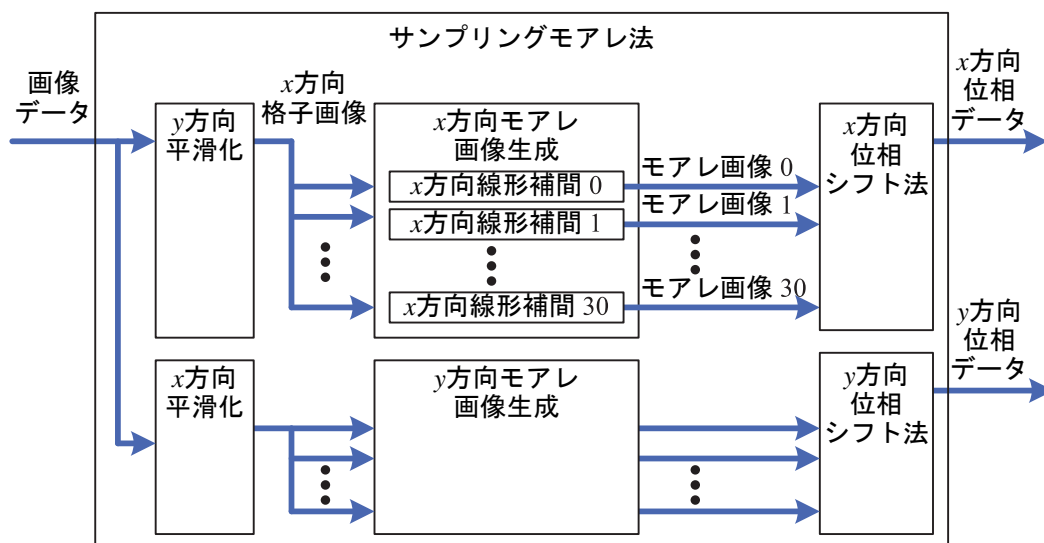


図 6.3 サンプリングモアレ法ブロック詳細

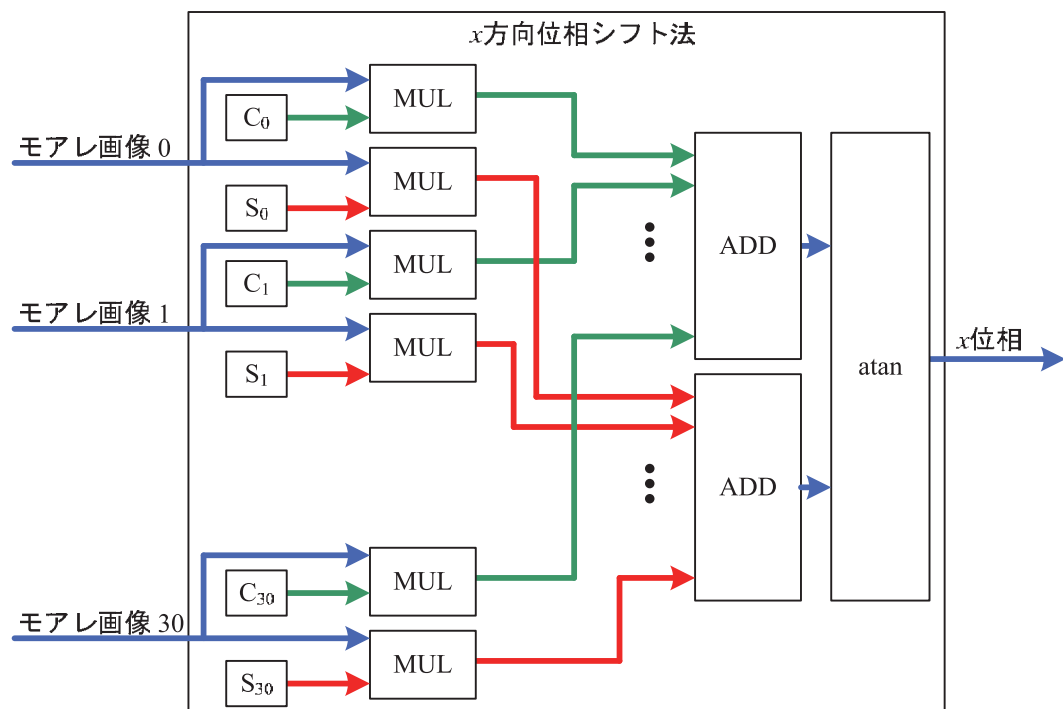


図 6.4 x 方向位相シフト法ブロック詳細

6-3 サンプリングモアレカメラを用いた三次元計測

サンプリングモアレカメラと投影装置を組み合わせて三次元計測装置を構築した。その装置の写真と構成を図 6.5 に示す。投影装置は Texas Instruments 社の LightCrafter を用いて、静止した格子の投影を行う。サンプリングモアレカメラから出力されるモアレの位相分布から、投影格子の位相分布を求めることも可能であるが、キャリブレーションに全空間テーブル化手法を用いることで、モアレの位相分布からでも高さを求めることができる。格子の位相分布を求める処理が不要なため高速になる。

カメラの画素数は、 $2048\text{pixel} \times 1024\text{pixel}$ 、露光時間は 4.7ms とする。サンプリング数は 27 とした。キャリブレーションには、全空間テーブル化手法を適用し、基準面枚数は 0mm から 9mm まで 0.5mm 間隔の 19 枚とした。基準面を平面試料としてキャリブレーションした際とは異なる位置として、 0.7mm から 1mm ピッチで 8.7mm まで計測した。平面試料に投影した格子画像と位相分布を図 6.6 に示す。中心を画像中心とした $1948\text{pixel} \times 924\text{pixel}$ の範囲の高さの標準偏差と平均値と誤差を表 6.1 に示す。また、画像中心の横 1 ラインの高さ分布を図 6.7 に示す。これらより、高さ方向 9mm の計測範囲を、平均誤差 0.008mm 、標準偏差 0.004mm で精度よく計測することができる結果が得られた。

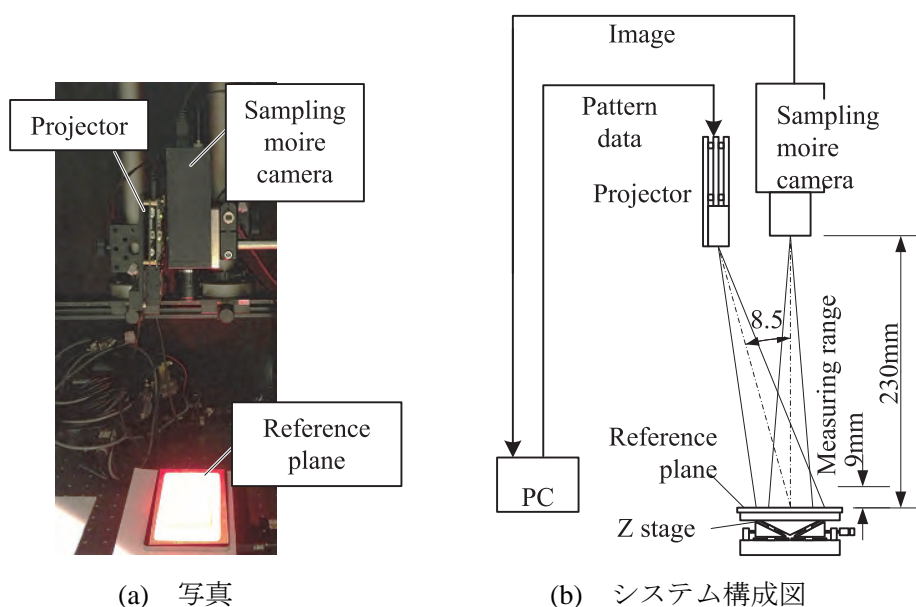
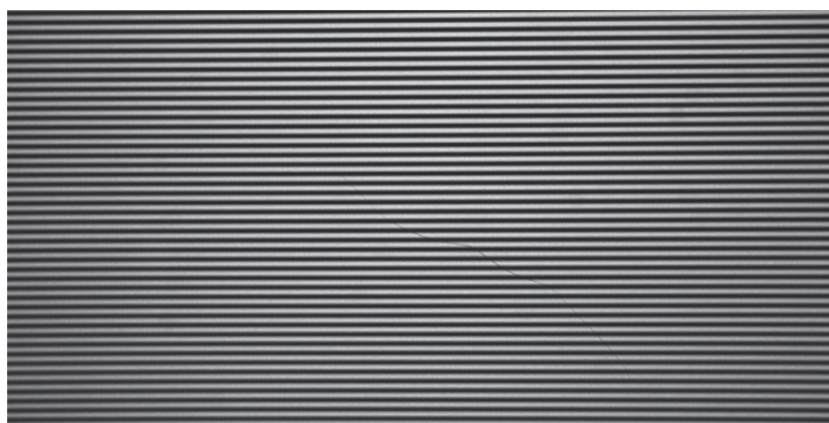


図 6.5 平面試料計測精度検証用の実験装置



(a) 格子画像



(b) 位相分布

図 6.6 平面試料の格子画像と位相分布

表 6.1 基準面の計測結果

試料高さ	0.700	1.700	2.700	3.700	4.700	5.700	6.700	7.700	8.700
計測結果									
平均	0.692	1.695	2.696	3.700	4.699	5.700	6.708	7.702	8.705
誤差	-0.008	-0.005	-0.004	0.000	-0.001	0.000	0.008	0.002	0.005
標準偏差	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003

Unit [mm]

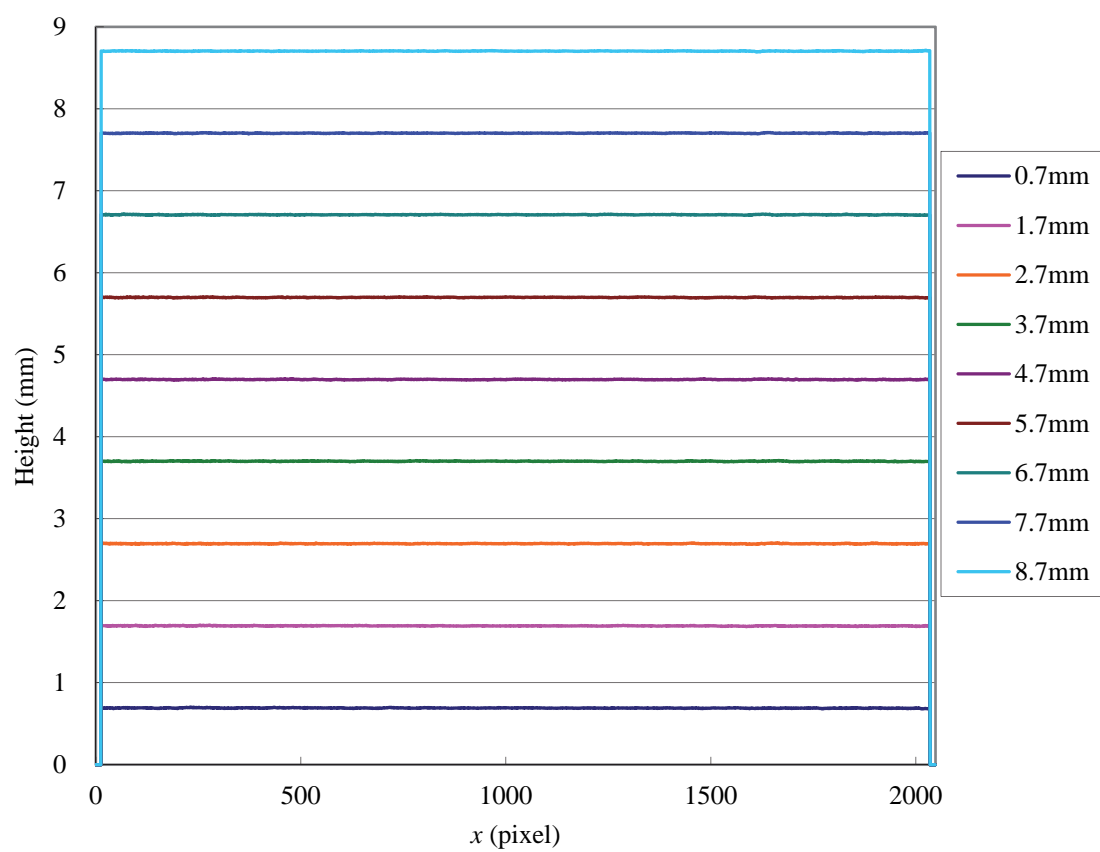
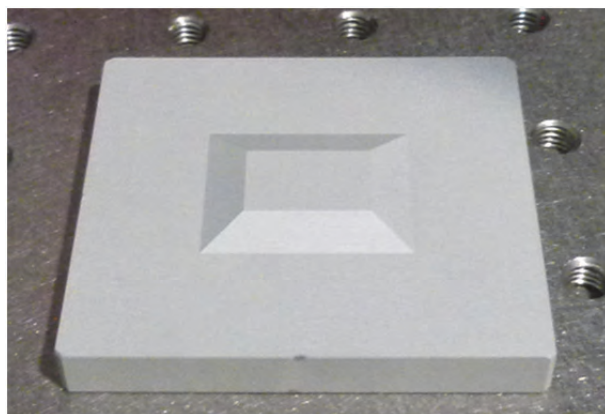
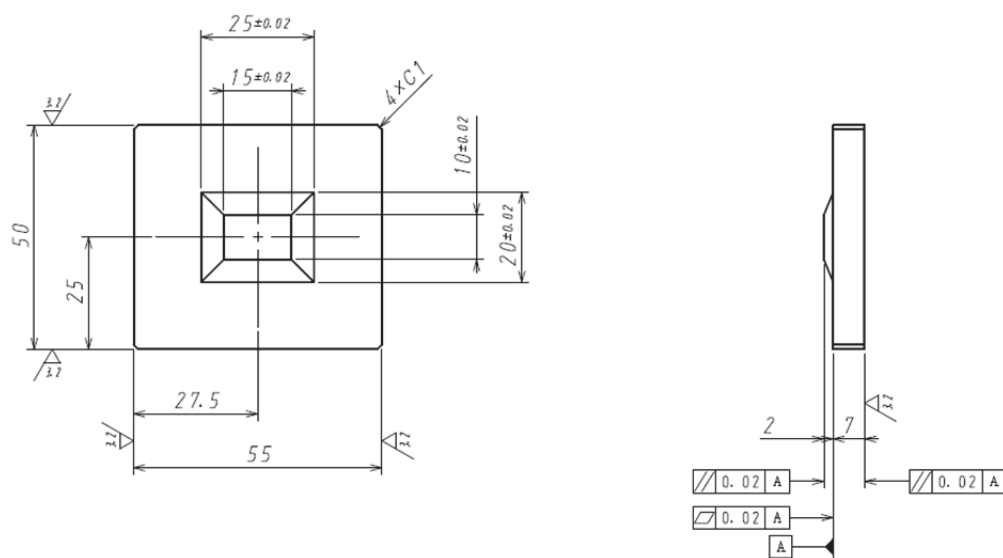


図 6.7 平面試料の格子画像と位相分布

次に、図 6.8 に示す台形試料を計測したときの、格子画像と位相分布、高さ分布を図 6.9 に示す。図 6.10 に図 6.9(c)中のライン A と B の高さ分布を示す。y 方向の平坦な面と傾斜面の変化する部分にノイズが発生しているのがわかる。これは、サンプリング数 27 の直線補間をする画素の高さの変化が一定でないためだと考えられる。図 6.10 に示す範囲の高さ平均と標準偏差を表 6.2 に示す。台形の高さをおおよそ 2mm で計測できている。計測速度は 15.4ms である。

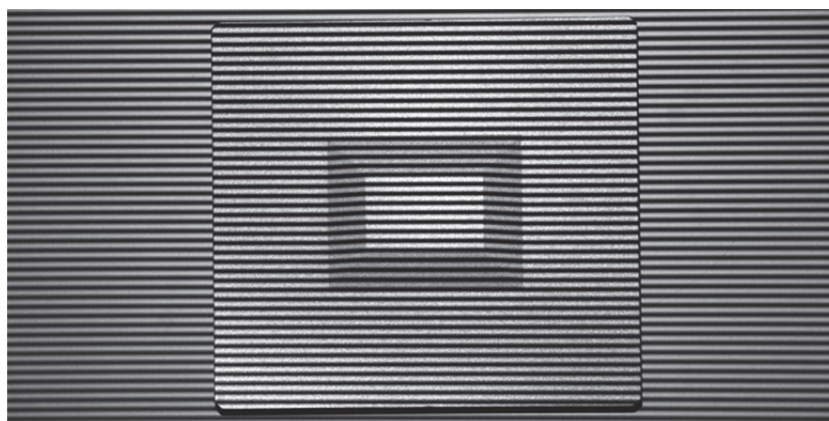


(a) 外観写真

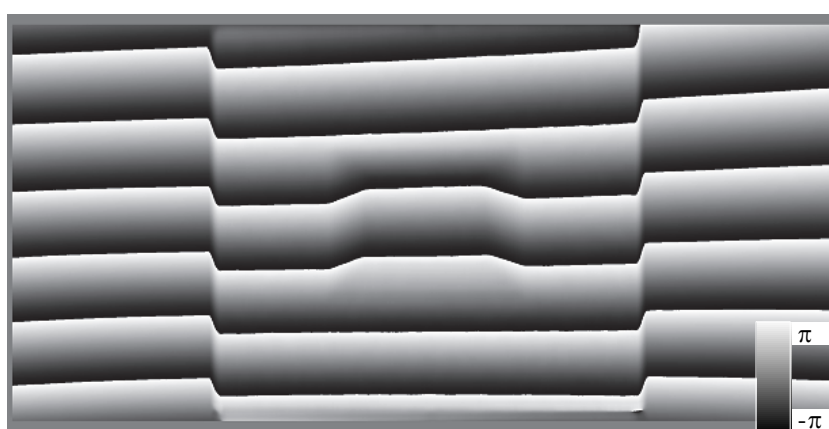


(b) 寸法図

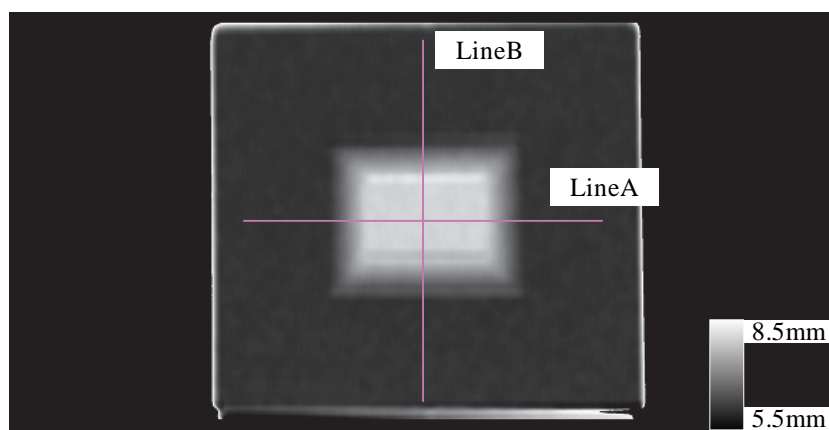
図 6.8 台形試料



(a) 格子画像

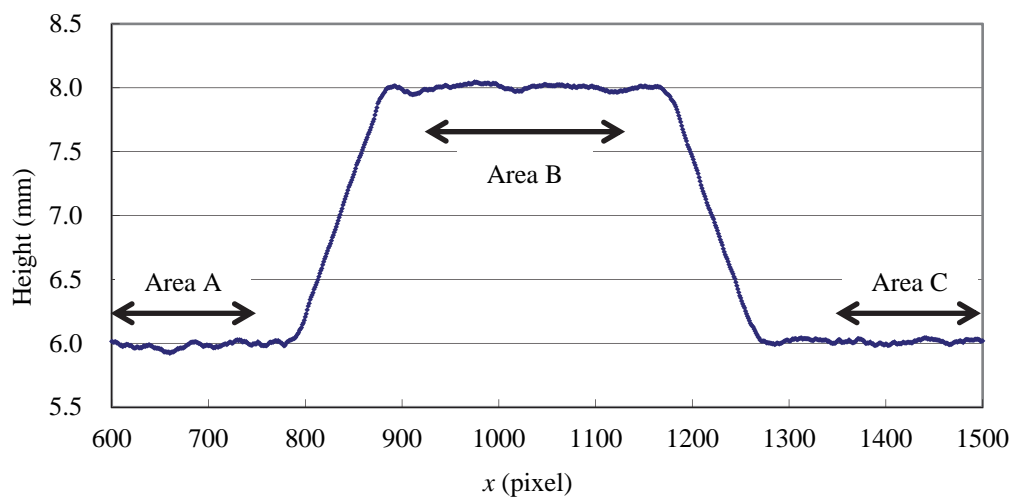


(b) 位相分布

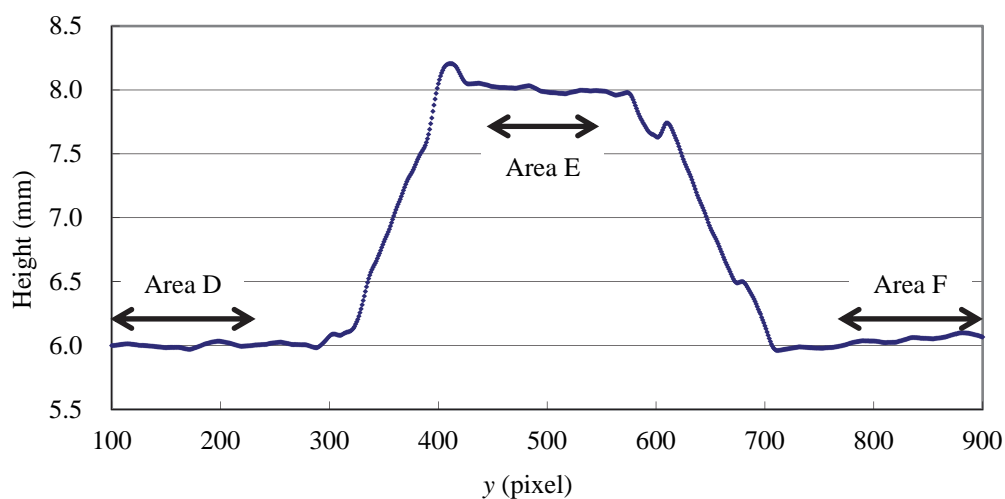


(c) 高さ分布

図 6.9 台形試料の計測結果



(a) Line A 上の高さ分布



(b) Line B 上の高さ分布

図 6.10 図 6.9(c)のライン状の高さ分布

表 6.2 図 6.10 に示す範囲の計測結果

	Area A	Area B	Area C	Area D	Area E	Area F
平均	5.982	8.005	6.012	6.001	8.001	6.041
標準偏差	0.024	0.020	0.015	0.015	0.019	0.034

Unit [mm]

6-4 位相シフト法とサンプリングモアレ法の比較

本節では，本研究で開発したサンプリングモアレカメラを用いて，サンプリングモアレ法と位相シフト法の精度の比較を行う．実験装置の写真と構成を図 6.11 に示す．投影装置は Texas Instruments 社の LightCrafter を用いて，サンプリングモアレ法の場合は 1 枚の静止した格子の投影を，位相シフト法の場合は 3 枚の位相シフトされた格子の投影を行う．位相シフト法による格子の撮影には，サンプリングモアレカメラの撮影の機能のみを用いた．

カメラの画素数は 512pixel×512pixel で，露光時間は 0.8ms，サンプリング数は 19 とした．キャリブレーションには全空間テーブル化手法を適用し，基準面枚数は，0mm から 3mm まで 0.5mm 間隔の 7 枚とした．基準面を平面試料として，キャリブレーションした際とは異なる位置である 0.2mm から 0.5mm ピッチで 2.7mm まで計測した．基準面に投影した格子画像と位相分布を図 6.12 に示す．中心を画像中心とした 1948pixel×924pixel の範囲の高さの標準偏差と平均値と誤差を表 6.3 に示す．また，0.2mm の位置に基準面を移動したときの画像中心の横 1 ラインの高さ分布を図 6.13 に示す．サンプリングモアレ法は，誤差-0.009mm，標準偏差 0.004mm で計測できている．位相シフト法は，誤差-0.011mm，標準偏差 0.021mm で計測できている．誤差は，どちらの手法でもほぼ同じである．サンプリングモアレ法はモアレ画像を生成する処理中に平滑化要素が含まれるため，標準偏差の良い結果が得られている．

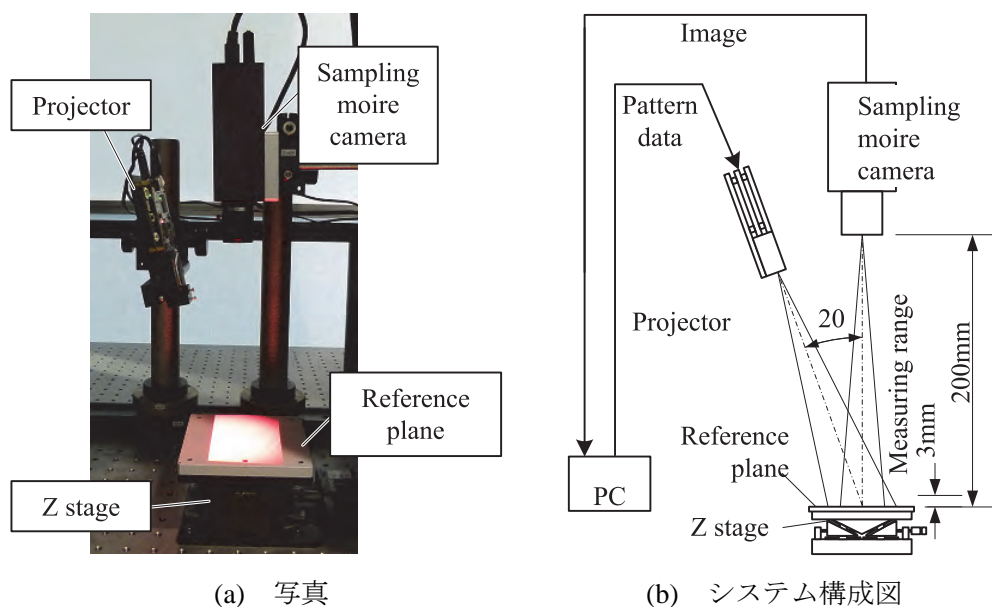


図 6.11 平面試料計測精度検証用の実験装置

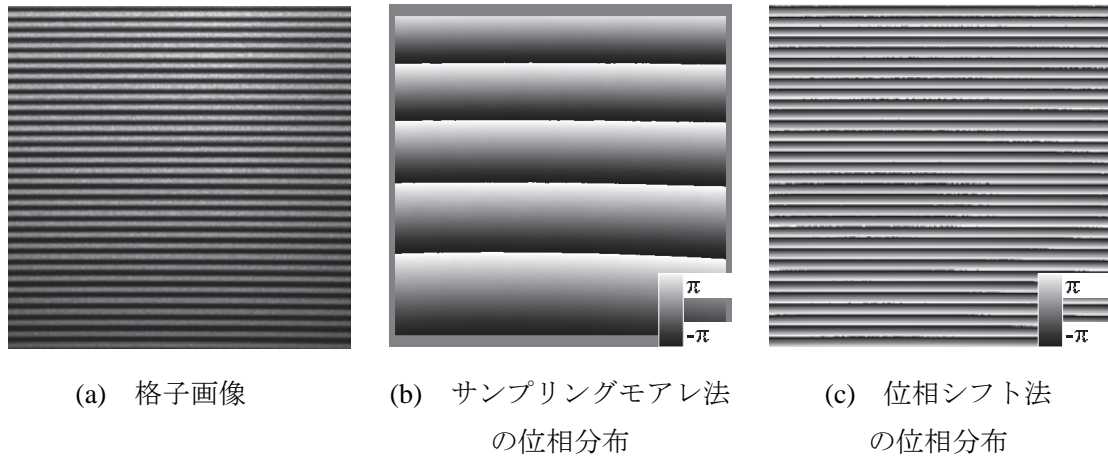


図 6.12 格子画像と各手法の位相分布

表 6.3 基準面の計測結果

	試料高さ	0.200	0.700	1.200	1.700	2.200	2.700
サンプルング モアレ法	平均	0.191	0.693	1.195	1.697	2.198	2.700
	誤差	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002	0.000
	標準偏差	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
位相シフト法	平均	0.189	0.693	1.195	1.697	2.198	2.700
	誤差	-0.011	-0.007	-0.005	-0.003	-0.002	0.000
	標準偏差	0.019	0.019	0.020	0.020	0.021	0.021

Unit [mm]

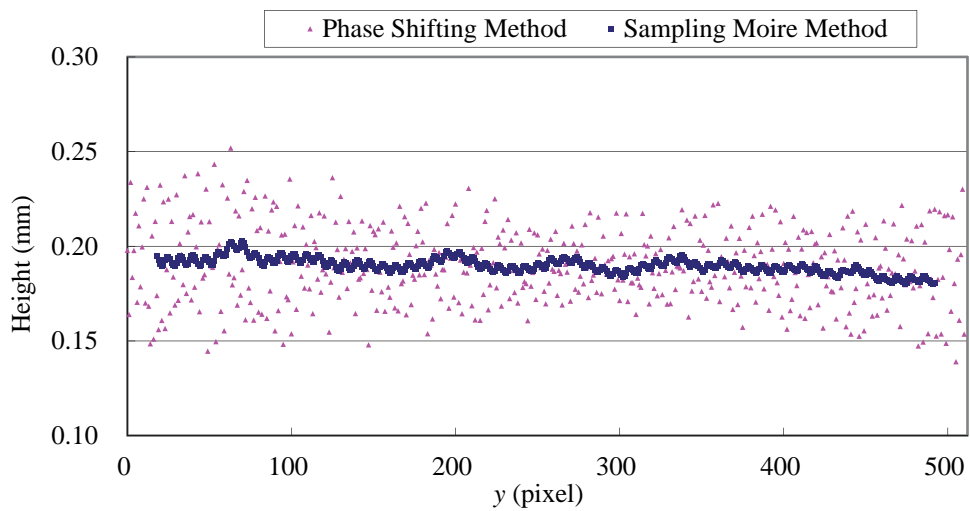


図 6.13 0.2mm の位置での中心 y 方向の高さ分布

次に台形試料の計測を行った。格子画像とそれぞれの手法での位相分布を図 6.14 に示す。位相分布を用いて高さに変換した結果として、高さ分布と鳥瞰図をそれぞれ図 6.15 と図 6.16 に示す。それらの結果から、台形の広いほうの傾斜部分の計測結果にサンプリングモアレ法ではノイズが発生しているのがわかる。図 6.15 の画像中心 x 方向と y 方向の高さ分布を図 6.17 示す。傾斜部分のノイズ成分を強調するため、それぞれの方向の高さ分布の微分(注目点 ± 5 画素の差分)を行った結果を図 6.18 に示す。ただし、ランダムノイズを除去するためにプロジェクション(注目点 ± 4 画素)を行っている。サンプリングモアレ法では、傾斜部分の立ち上がりがなまっているのと、サンプリング方向に大きなノイズが出ているのが確認できる。傾斜部分は、サンプリング数 19 の直線補間をする画素の高さの変化が一定でないためだと考えられる。それぞれの手法で図 6.14(a)の平坦な各エリア(50pixel \times 50pixel)を平均した結果と、それらの差を表 6.4 に示す。高さの変化のない部分では、同じ計測ができているといえる。

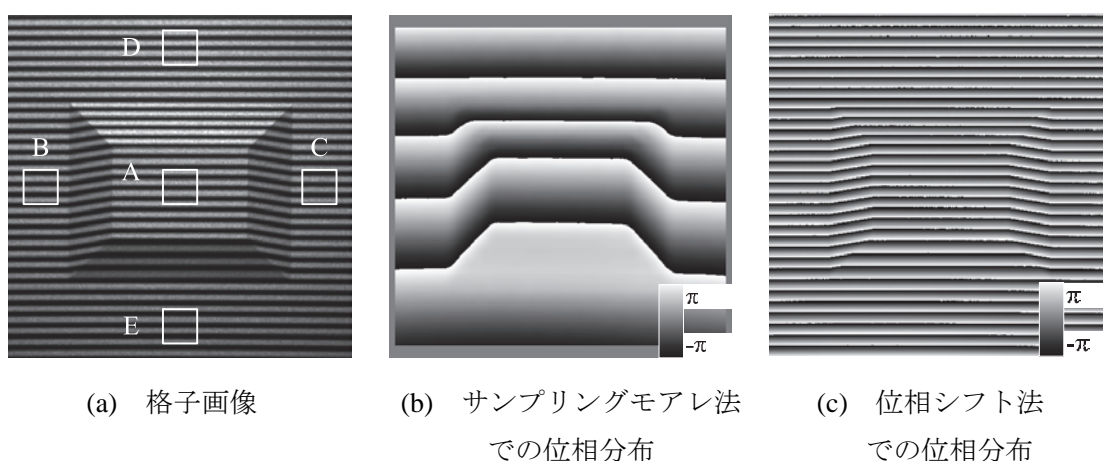


図 6.14 格子画像と各手法での位相分布

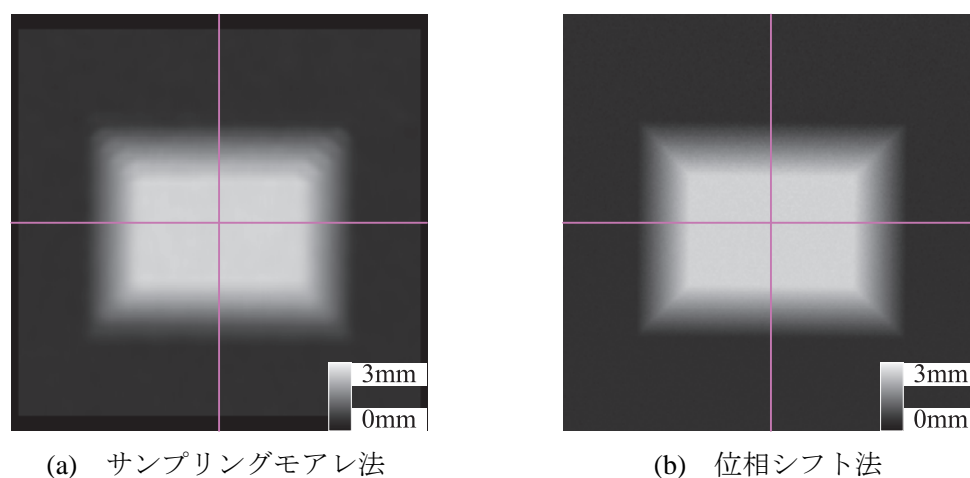
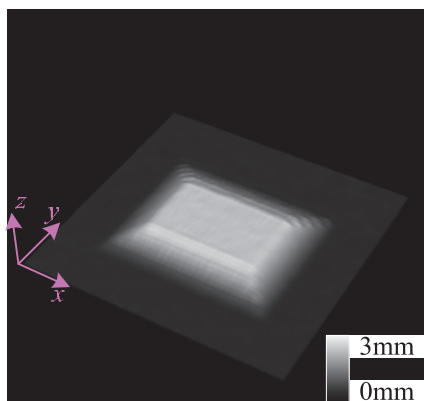
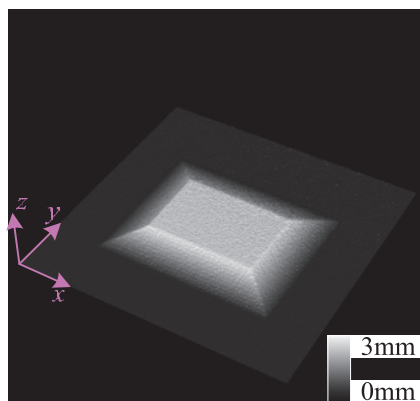


図 6.15 各手法での高さ分布

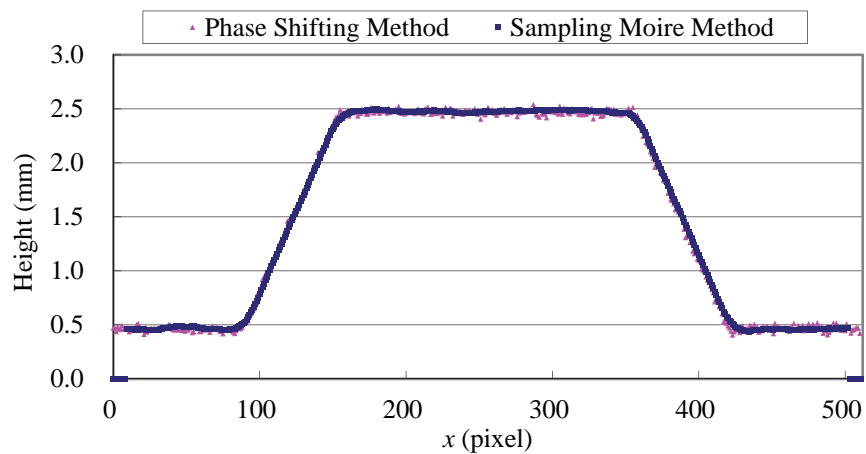


(a) サンプルングモアレ法

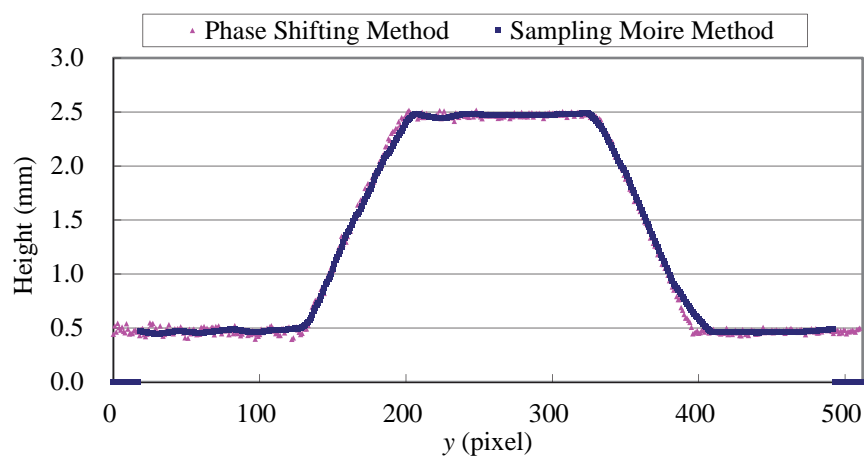


(b) 位相シフト法

図 6.16 各手法での計測結果の鳥瞰図

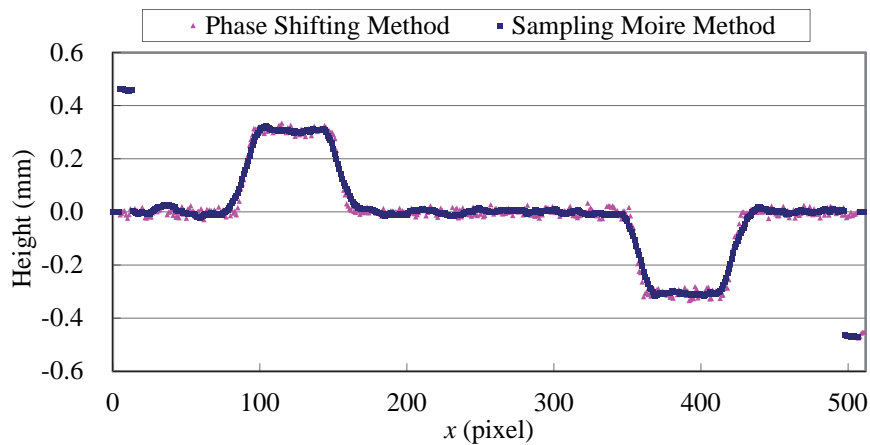


(a) x 方向の高さ分布

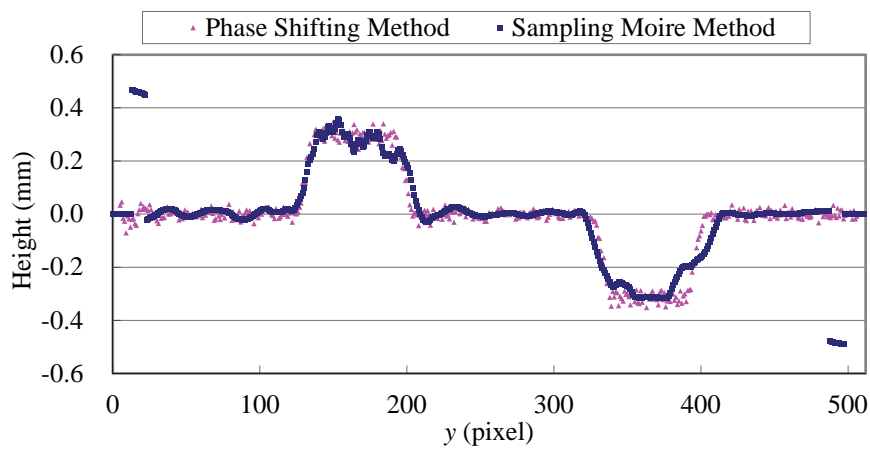


(b) y 方向の高さ分布

図 6.17 図 6.15 中のライン状の高さ分布



(a) x 方向の高さ分布



(b) y 方向の高さ分布

図 6.18 図 6.17 の高さ分布を微分した結果

表 6.4 図 6.14(a)に示す範囲の計測結果

	Area A	Area B	Area C	Area D	Area E
サンプリングモアレ法	2.474	0.467	0.456	0.466	0.470
位相シフト法	2.471	0.468	0.464	0.467	0.468
差	0.003	0.000	-0.008	-0.001	0.002

Unit [mm]

6-5 リアルタイム三次元計測

本節では、1枚の格子画像から高速な位相解析処理が可能なサンプリングモアレカメラの利点を活かしリアルタイムで対象物の三次元計測を行う。実験装置の写真と構成を図 6.19 に示す。投影装置は Texas Instruments 社の LightCrafter を用いた。カメラの画素数は 1024pixel×100pixel とし、露光時間は 1.0ms、サンプリング数は 13 とした。キャリブレーションには全空間テーブル化手法を適用し、基準面枚数は 0mm から 5mm まで 0.25mm 間隔の 21 枚とした。

厚紙の両端を固定し、モーターを回転させることで厚紙に定在波を発生させて、節の付近を 2.3ms (約 434Hz)間隔で計測を行った。ある時刻の位相分布と高さ分布を図 6.20 に示す。

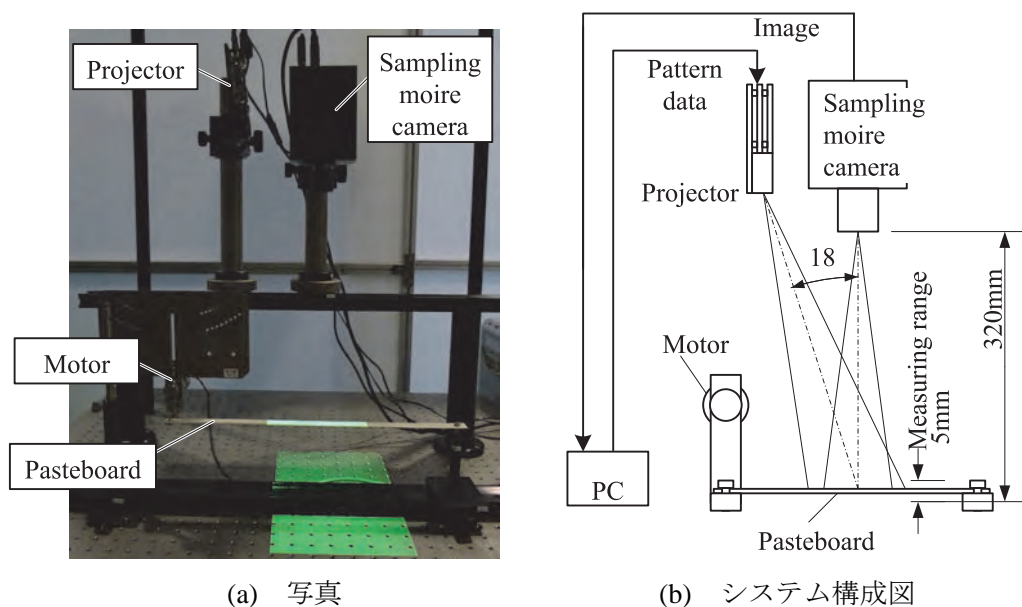


図 6.19 リアルタイム計測システム

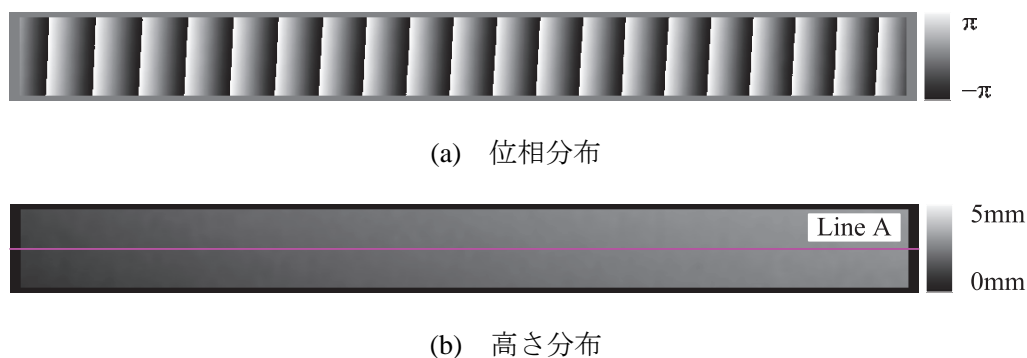


図 6.20 定在波を発生させた厚紙の計測結果

つぎに、図 6.20(b)中のライン A の 2.3ms 毎の高さ分布を図 6.21 に示す．完全に静止してはいないが、600pixel 付近に節を確認することができる．また、図 6.20(b)中のライン A 上の $x=12\text{pixel}$ から 912pixel まで 100pixel 間隔の各座標の高さの変位を図 6.22 に示す．一定の周期で変位していることが確認できる．

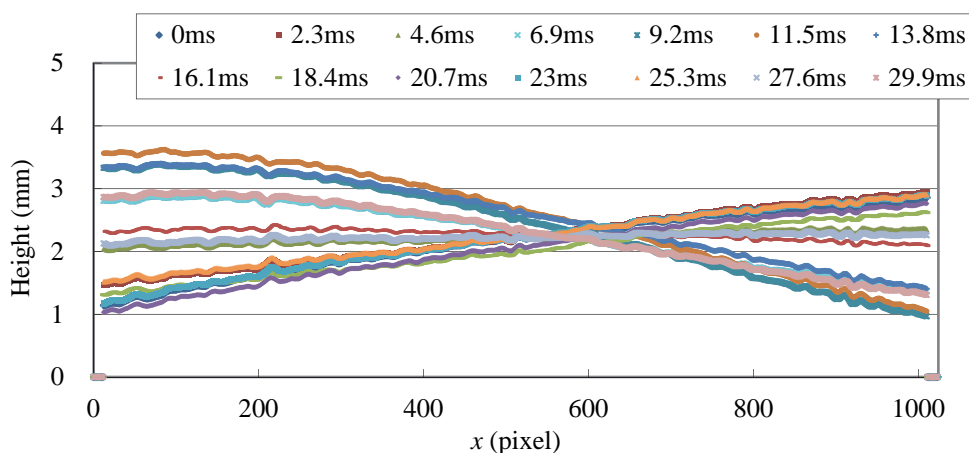


図 6.21 図 6.20(b)のライン A の 2.3ms 毎の高さ分布

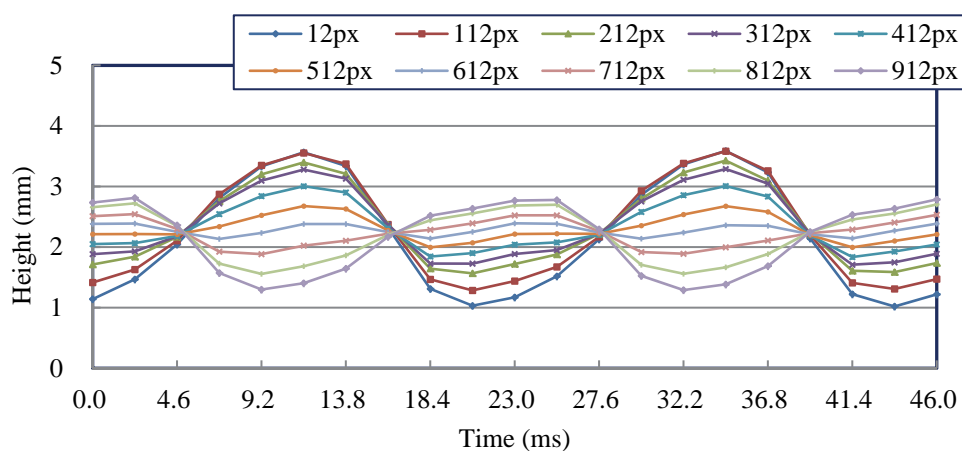


図 6.22 図 6.20(b)のライン A 上の任意の座標の高さ変化

比較計測として、サンプリングモアレカメラによる計測と同時ではないが、図 6.23 のようにキーエンス社のレーザー変位計 LK-G15 による計測を行った結果を図 6.24 に示す．図 6.20(b)中のライン A 上の各座標の計測結果とレーザー変位計の計測結果を周波数分解した結果を図 6.25 に示す．レーザー変位計と同じ周波数付近で振幅の極大を得ていることを確認することができる．

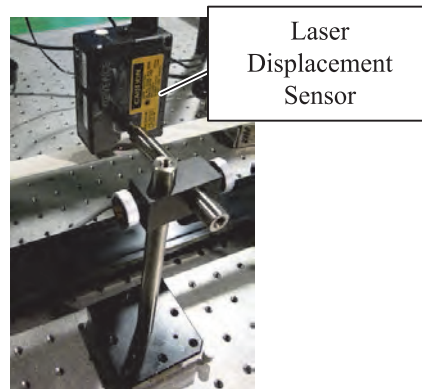


図 6.23 レーザー変位計での計測

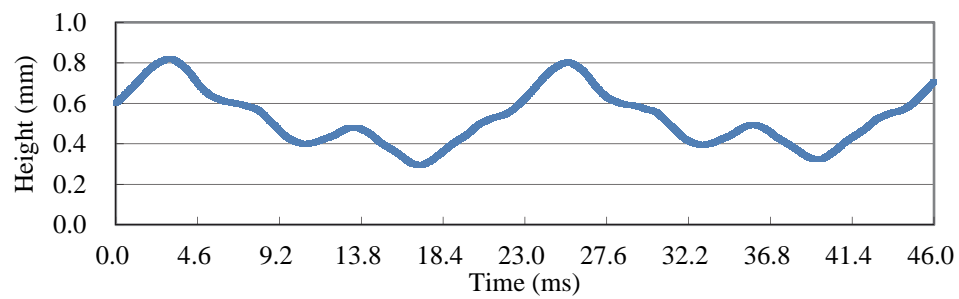


図 6.24 レーザー変位計での計測結果

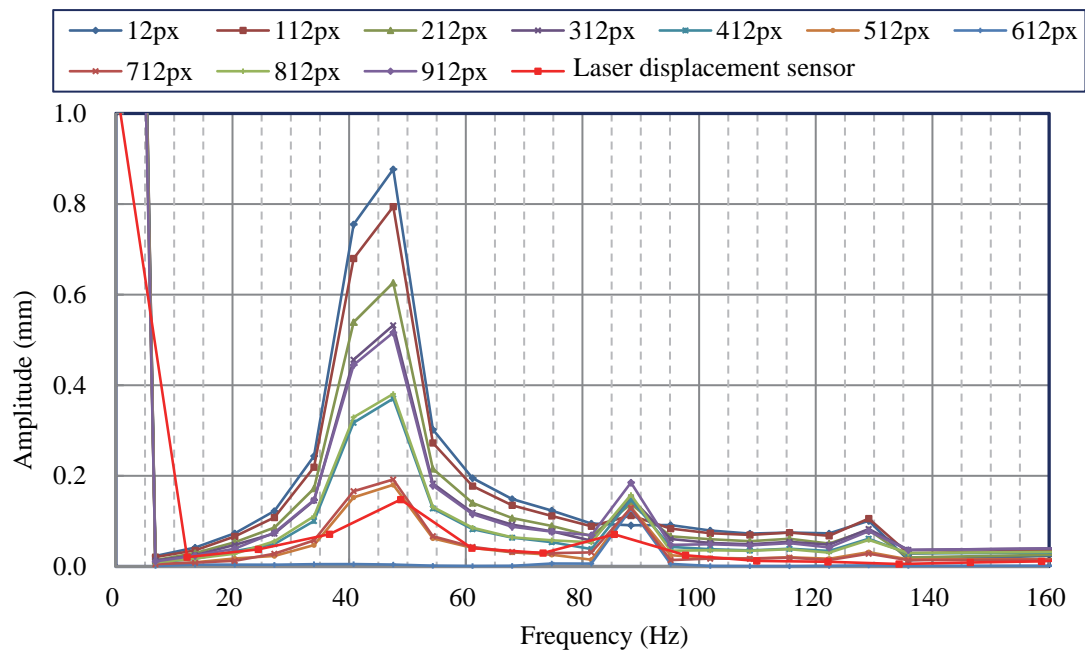


図 6.25 図 6.20(b)のライン A 上の任意の座標の高さ変化と
レーザー変位計の高さ変化のデータを周波数分解した結果

6-6 おわりに

本章では、FA 分野で用いることが可能な高速、小型・軽量のサンプリングモアレカメラの開発を行った。本カメラは、全撮影領域の 2048pixel×1024 pixel の場合は 60fps のリアルタイムで、撮影領域を最小にした場合は 100kfps のリアルタイムで 1 方向の位相解析を行うことができるため高速である。また、寸法は 86mm×44mm×128mm で重さは 720g と小型・軽量である。

また、本カメラを用いた三次元計測装置を構築して、精度評価のため試料の計測を行った。平面試料は、9mm の計測範囲を、平均誤差 0.008mm、標準偏差 0.004mm で計測することができた。台形試料は、サンプリング方向の高さの変化が一定でない部分にノイズが発生しているものの、その部分以外は、位相シフト法と同程度の精度で計測することができる。

さらに、高速にリアルタイムで三次元計測ができることを確認するため、厚紙に定在波を発生させて節の付近を 2.3ms 間隔で計測を行い、レーザー変位計での計測結果と比較を行った。同じ周波数付近で振幅の高い結果が得られたことにより、約 434fps のリアルタイムで三次元計測を行うことが可能であることを確認できた。これらの結果より、FA 分野において、調整工程における振動計測など、リアルタイムで三次元計測を行いたい用途にサンプリングモアレカメラを適用することが可能であるといえる。

7. 従来の格子投影装置との比較

7-1 はじめに

従来の機械的な位相シフト機構をもつ格子投影装置は、光源、レンズ、ガラス格子、移動ステージなどで構成されている。この投影装置は、ガラス格子を移動ステージによって移動させることで、位相シフトされた格子を投影する。投影された格子は、透過率がよく、コントラストが高い。移動ステージの位置決め精度と速度は、三次元計測の精度と速度に直接影響する。高精度に計測する用途では、位置決め精度が高いピエゾステージと高分解能エンコーダーの組み合わせが多く用いられる。そのため高価である。また、光源にはハロゲンランプなどが用いられているため、格子投影装置の寸法は大きく、重量も重い。そのため、FA 分野で用いることは困難であった。しかし、近年では、光源には LED を、移動ステージのアクチュエータに超音波モーターを用いることで小型・軽量化が可能である。

また、従来の DMD や液晶などの画素を用いた投影装置は、電氣的に格子の位相シフトを行うことができる。これらは、機械的な位相シフト機構を持つ格子投影装置と比較すると高速である。しかし、液晶では、投影パターンの電氣的な切り替え信号から実際に液晶が動作するまでの応答時間が変化する問題があり、その応答速度は数 ms かかる。DMD を用いた投影装置も、濃淡の格子を投影する場合の応答速度は 120Hz(約 8.3ms)である。そのため、十分高速に格子の位相シフトをすることはできない。また、隣り合う画素の間の隙間は、光の投射されない部分として投影する格子に含まれてしまう。そのため、計測精度が悪化する問題がある。

本章では、従来手法を用いた投影装置と、本研究で開発した投影装置の位相シフトの速度とサンプリングモアレカメラの計測速度について比較を行う。そのため、従来手法を用いた投影装置は、FA における小型・軽量の要求を満たしている装置を選択する。ただし、機械的な位相シフト機構を持つ投影装置は開発されていないため、小型・軽量化した投影装置の開発を行う。7-2 節では、超音波モーターについて述べる。7-3 節では、機械的な位相シフト機構を持つ投影装置の小型・軽量化として、超音波モーターを用いた投影装置を開発する。次に、本投影装置を用いて三次元計測を行った結果と位相シフト機構の応答速度について述べる。7-4 節では DMD を用いた投影装置を使用して三次元計測を行った結果と位相シフトの速度について述べる。最後に 7-5 節に本章のまとめを記す。

7-2 超音波モーター

超音波モーターは、小型で高トルク、応答性や静粛性が高いなどの特性を持っている。コイルやマグネットなどによる磁力を用いることなく、圧電効果による振動を移動運動に変換する摩擦式のモーターである。

本研究では、図 7.1 に示すピエゾテック社製の TULA シリーズの直動型超音波モーターを用いた。これは、駆動軸の根元に圧電セラミックスが固定されており、駆動軸を板バネで移動体に挟み込んでいる。移動原理は、圧電セラミックスが振動して駆動軸に伝わり、その振動の行きと帰りの Duty 比を変える事で移動体を、微小な置き去り、または、引き寄せで移動させる。例えば、図 7.2 に示すように上に移動したいときは、上方向にゆっくりと移動させて、早く元に戻すことで、置き去り状態にしていく。下に移動したいときは、その逆を行う。微小の移動を高い振動周波数でコントロールしているため、アクチュエータとしては滑らかに移動することが可能である。小型の形状に対し、推力、保持力が高く取れる位置決め用アクチュエータである。

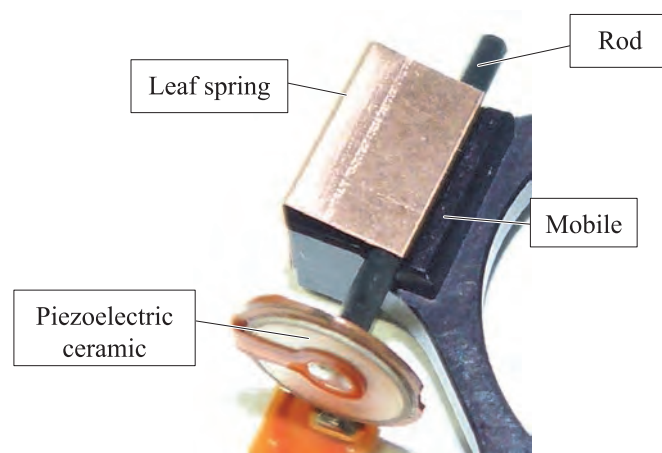


図 7.1 直動型超音波モーター

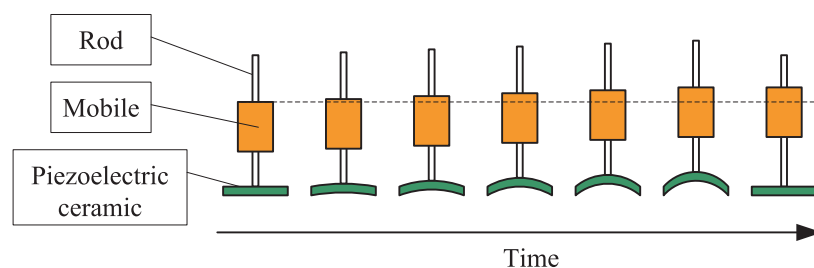


図 7.2 直動型超音波モーターの移動原理

7-3 超音波モーターを用いた格子投影装置

開発した超音波モーターを用いたガラス格子の移動ステージを図 7.3 に示す。超音波モーターにはピエゾテック社製の超音波モーターTULA50 を用いた。ベースに TULA50 を固定し、ガラス格子を貼り付けたスライダを移動体として構成している。スライダの位置決めには、 $1\mu\text{m}$ の分解能をもつ光学式エンコーダーを用いている。移動ステージの制御は、ステージコントローラーが行っており、USB により PC から操作することができる。移動ステージ部分の寸法は、 $35\text{mm}\times 35\text{mm}\times 8\text{mm}$ と小型である。本移動ステージに、LED と投影レンズを組み合わせて試作した小型の格子投影装置を図 7.4 に示す。本格子投影装置の寸法は $52\text{mm}\times 45\text{mm}\times 58\text{mm}$ で、重さは 200g である。

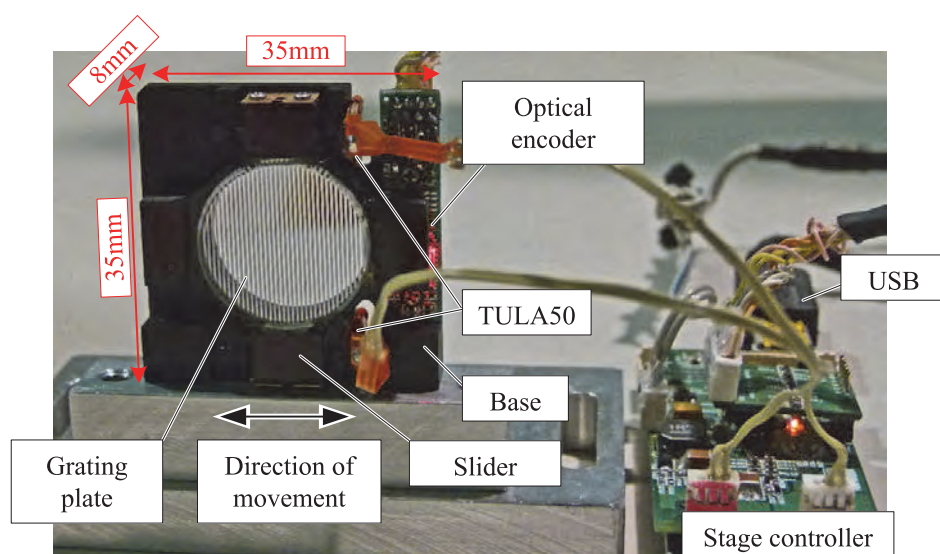


図 7.3 超音波モーターを用いたガラス格子移動ステージ

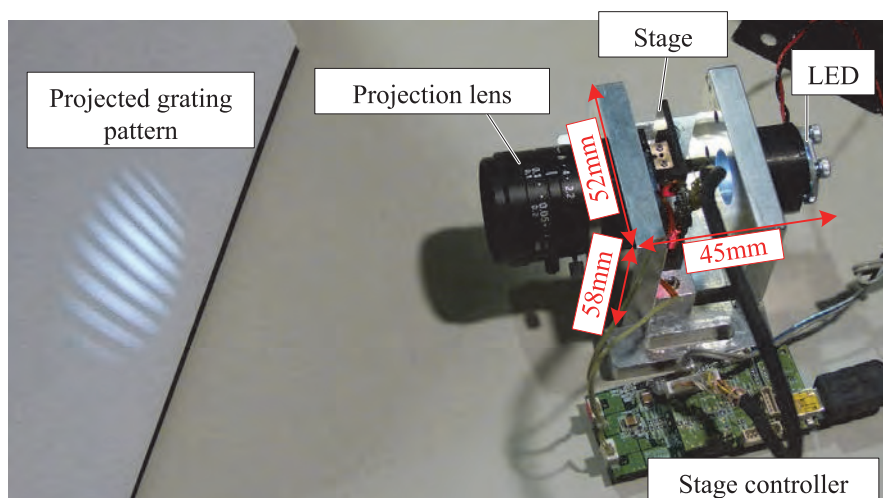
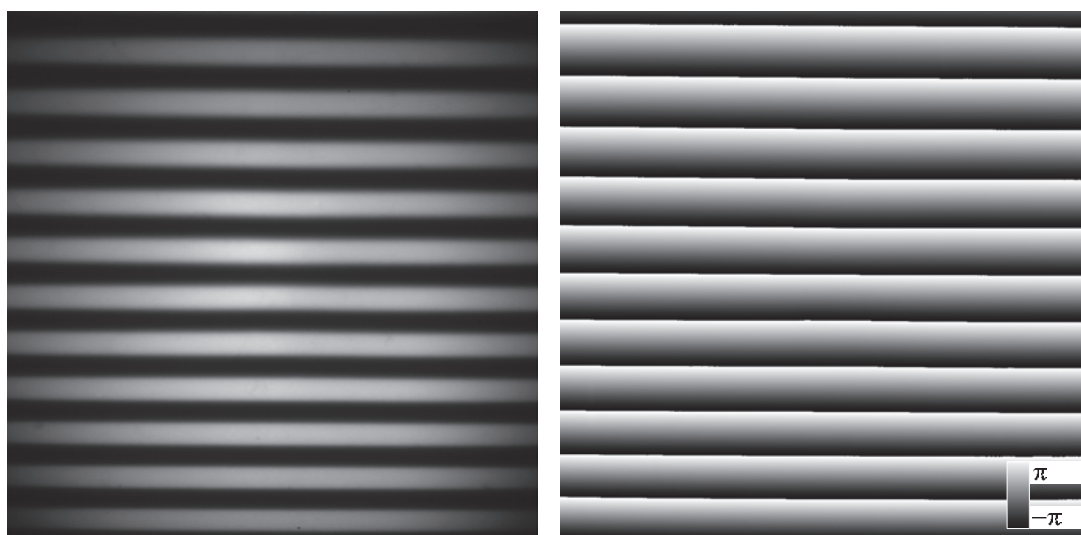


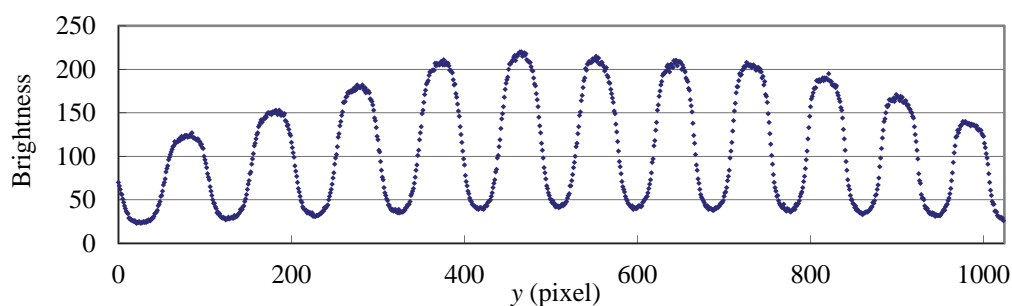
図 7.4 投影装置を用いた格子投影の様子

本格子投影装置と Photonfocus 社製の白黒 CMOS カメラ MV-D1024E-80-CL を組み合わせて三次元計測を行った。キャリブレーションは、高さの異なる 2 枚の基準面を用いて、位相シフト回数は 16 とした。基準面を平面試料として計測を行った際の格子画像と位相分布、それぞれの中心 y 方向の輝度分布と位相分布を図 7.5 に示す。LED のむらにより、投影した格子の輝度分布は中心が高く周辺が低くなっているが、位相解析した結果は $-\pi$ から π の繰り返しの中で直線状になっているため、精度よく位相シフトができているといえる。

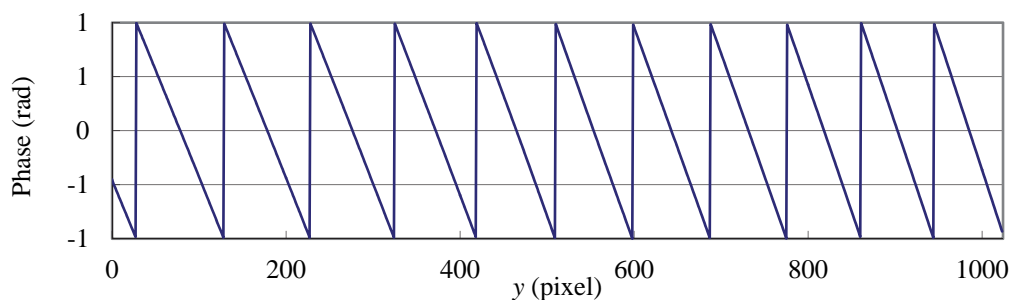


(a) 格子画像

(b) 位相分布



(c) (a)の中心 y 方向の輝度分布



(d) (b)の中心 y 方向の位相分布

図 7.5 平面試料への投影と位相解析結果

また、機械的な位相シフト機構を持つ格子投影装置を用いた三次元計測の精度は、位相シフト機構の位置決め精度によっても影響される。その影響を確認するため、任意の座標において、3mmの高さの平面試料の三次元計測を30回繰り返し行った結果を図7.6に示す。任意の座標における繰り返しの標準偏差は0.018mmであった。このときの高さの計測レンジは3.5mmである。

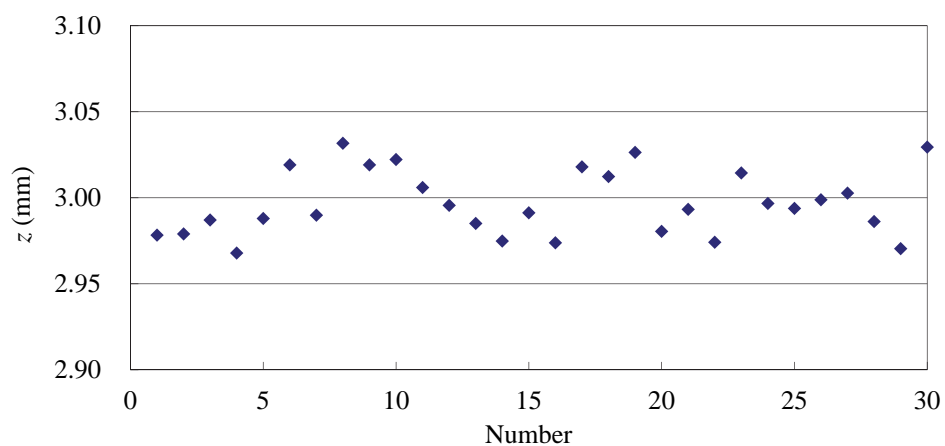
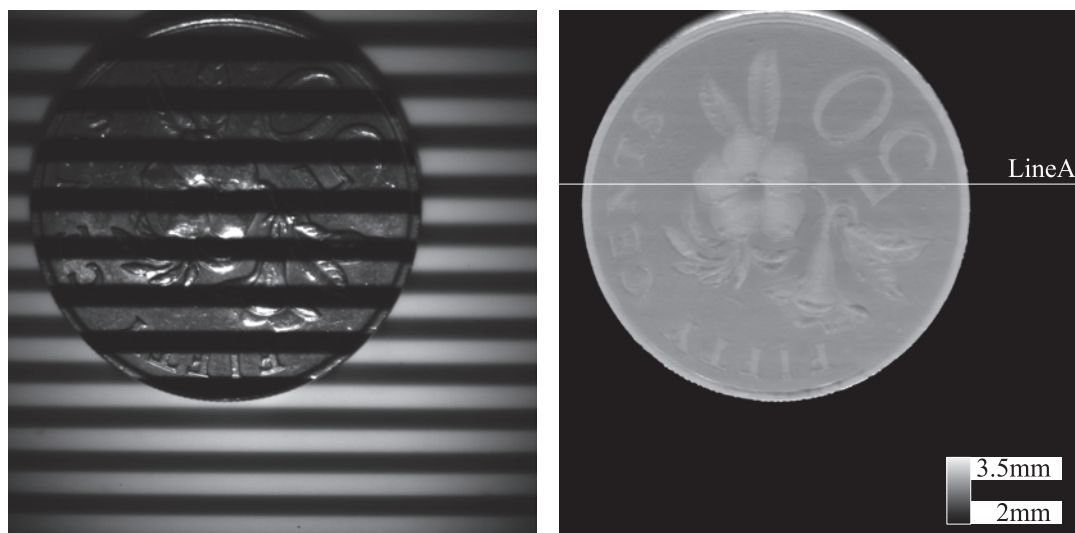


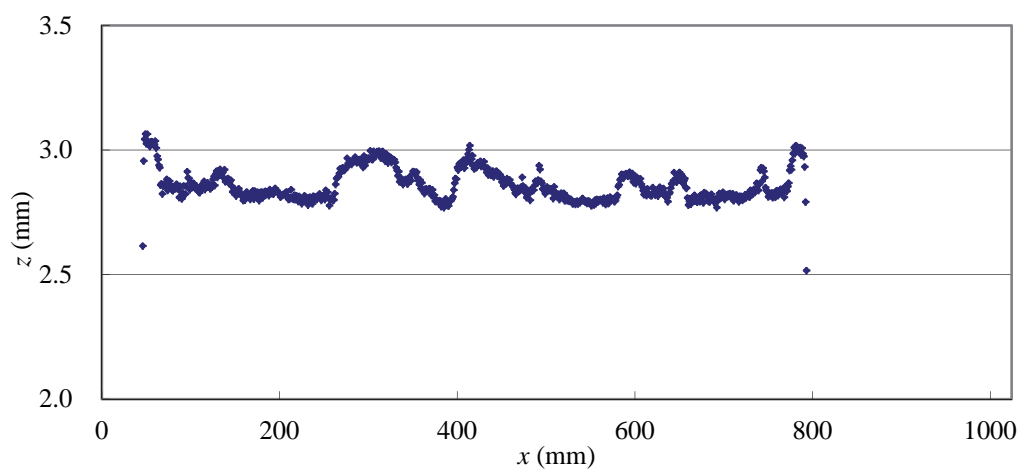
図 7.6 繰り返し平面試料を計測した任意の座標の高さ

次に、コインを三次元計測した結果を図 7.7 に示す．図 7.7(b)のライン A 上の高さ分布を
図 7.7(c)に示す．コインの表面上の凹凸も計測することができている．



(a) 格子画像

(b) 高さ分布



(c) (b)のライン A 上の高さ分布

図 7.7 コインの三次元計測結果

ガラス格子のピッチは 0.508mm のものを用いた．1 回の位相シフトによる移動量は 0.03175mm であるが、光学エンコーダーの分解能が 0.001mm のため 0.032mm の移動とした．1 回の位相シフトの移動にかかる時間は 100ms である．また、移動終了位置から開始位置に戻るまでの時間は 200ms である．位相シフト回数 16 回としたときの計測にかかる時間は、 1.5s で、連続で計測する場合は戻りの時間が必要なため、計測間隔は 1.7s である．

7-4 DMD を用いた投影装置

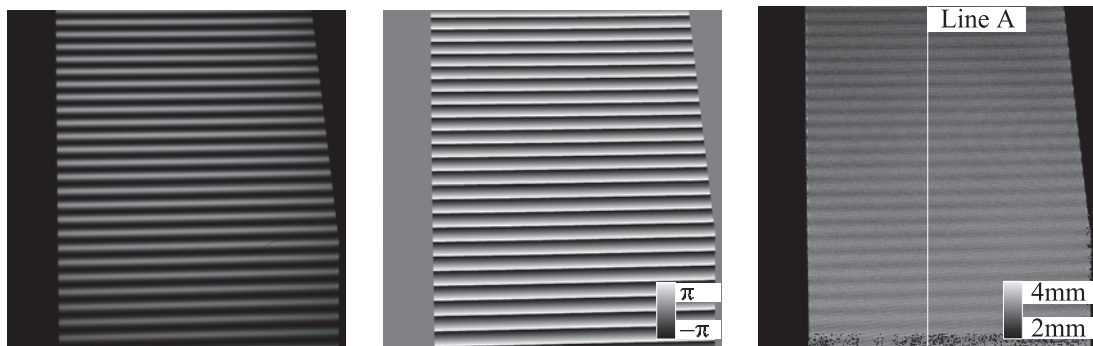
微小なミラーが二次元状にならべられた DMD は、ミラーの傾きを高速に切り替えることで投影パターンを形成する。DMD を投影装置に用いることにより 2kHz で位相シフトを行い 667Hz で形状計測が行われた例が報告[23]されている。しかし、これは FA で用いるためには小型でない。DMD を用いた評価用の投影装置として図 7.8 に示す Texas Instruments 社の LightCrafter がある。この投影装置の寸法は、65mm×117mm×23mm で、重さは 160g である。FA 分野で用いるために十分小型、軽量であるといえる。この投影装置の応答速度は、2 値の階調のパターンを投影する場合では、最大 4kHz である。しかし、2 値のパターンを時間積算して濃淡の階調を表すため、濃淡の格子を投影する場合の応答速度は 120Hz 程度である。これは、FA 分野で用いるには十分高速ではない。

本節では、この投影装置を用いて三次元計測をおこない精度の評価を行う。投影装置から出力されるトリガー信号をカメラとの同期に用いて撮影を行った。カメラの画素数は 2032pixel×2048pixel、露光時間は 4.5ms で、カメラの露光時間と転送時間から位相シフト速度は 100Hz とした。DMD の 16 画素を格子の 1 周期として、位相シフト数 16 回で投影を行う。この条件で、全空間テーブル化手法を用いてキャリブレーションを行った。基準面枚数は、0mm から 36mm まで 2mm 間隔の 19 枚とした。その後、基準面を平面試料として用いた精度確認実験を行った。投影する格子は、濃淡の階調をつけることにより正弦波状にした格子を用いた。

まず、基準面をキャリブレーションの際とは異なる位置として、3mm の位置で計測を行った。格子画像と位相分布、高さ分布、1 ラインの高さ分布をそれぞれ図 7.9(a)から(d)に示す。次に、3mm から 27mm まで 6mm ピッチで移動させ計測を行った。その時の撮像中心の横 1 ラインの高さ分布を図 7.10 に示す。



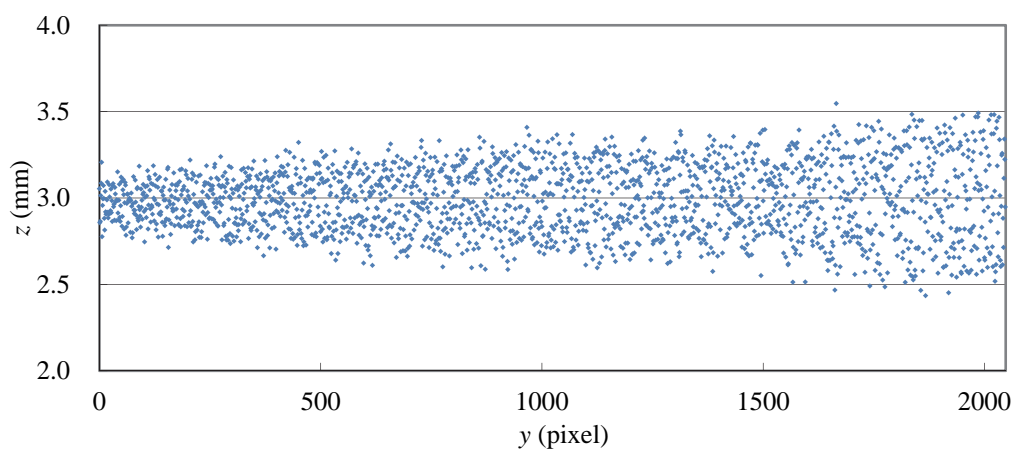
図 7.8 Texas Instruments 社製の LightCrafter



(a) 格子画像

(b) 位相分布

(c) 高さ分布



(d) (c)のライン上の高さ分布

図 7.9 3mm の位置に移動した基準面を計測した結果

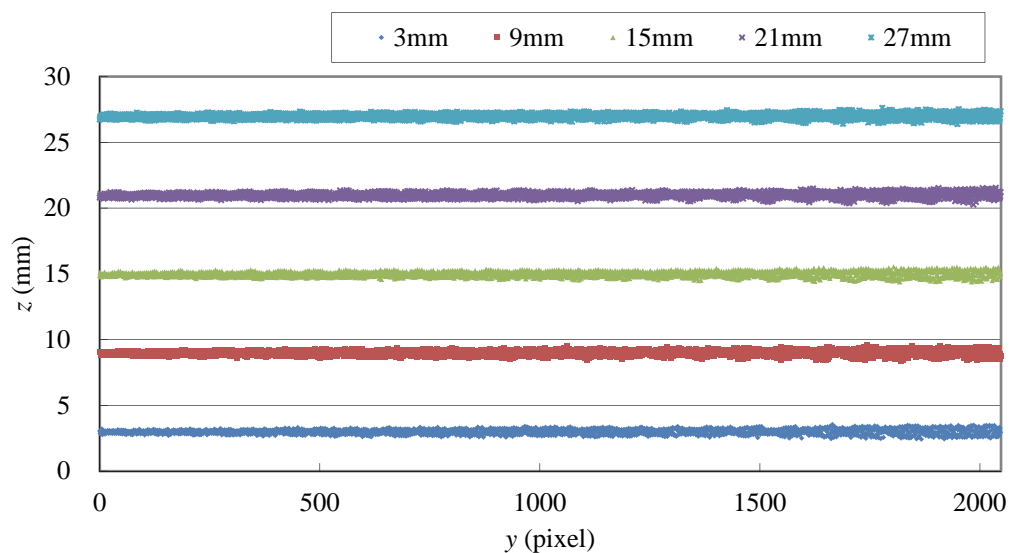


図 7.10 基準面の高さ分布

この縦 1 ラインの高さ分布を用いて平均と実際の位置との誤差，標準偏差を求めた結果を表 7.1 に示す．これらより，高さ計測レンジ 36mm に対して，計測誤差 0.024mm，標準偏差 0.206mm の計測ができる結果を得た．

DMD など画素を用いた投影装置は，光の投射されない部分として隣り合う画素間の隙間が投影する格子に含まれてしまう．そのため計測精度が悪化する問題がある．図 7.11 に示した図 7.9(a)の中心 y 方向の輝度分布より，画像中心付近の格子の 1 周期は，カメラの 84 画素分であることがわかる．本実験では，DMD の 16 画素で格子 1 周期の投影をしているため，DMD の画素の隙間はカメラの 5.25 画素毎に投影される．そのため，輝度値の高い部分では約 5 画素周期で輝度値が低くなっていることがわかる．本投影装置にも，画素の隙間が投影されていることが確認される．今後，さらに高精度化が必要な際の問題になる．

表7.1 基準面高さ計測結果

高さ	3.000	9.000	15.000	21.000	27.000
平均	2.990	8.984	14.982	20.976	26.976
誤差	0.010	0.016	0.018	0.024	0.024
標準偏差	0.200	0.203	0.206	0.204	0.201

Unit[mm]

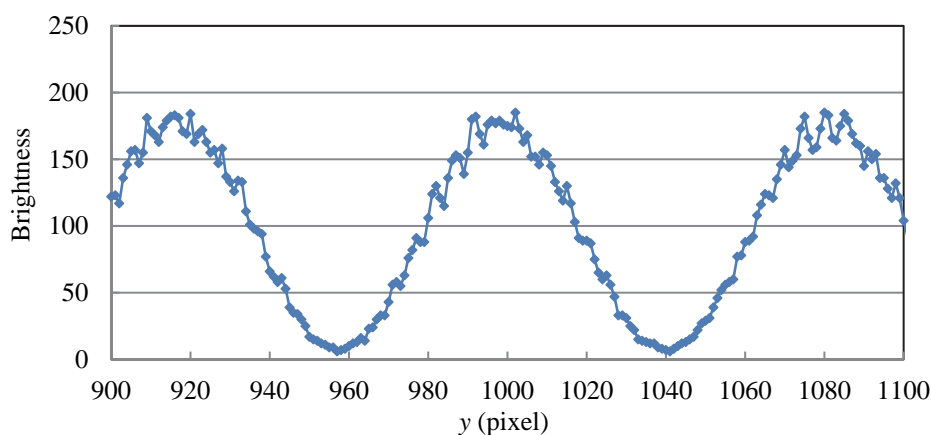


図 7.11 図 7.9(a)の中心 y 方向の輝度分布

7-5 おわりに

本章では、まず機械的な位相シフト機構をもつ格子投影装置の小型化として、超音波モーターを用いたガラス格子の移動機構の開発を行った。その結果、寸法 $35\text{mm} \times 35\text{mm} \times 8\text{mm}$ と小型化された移動機構を用いて、寸法 $52\text{mm} \times 45\text{mm} \times 58\text{mm}$ で、重さ 200g の格子投影装置を開発することができた。また、位相解析した結果は $-\pi$ から π の繰り返しの中で直線状になっているため精度よく位相シフトができており、コインの表面上の凹凸も三次元計測することができている。この時の位相シフト回数は 16 回であり、1 回の位相シフトの時間は 100ms で移動量は 0.032mm である。位相シフト 16 回行うためには、 1.5s かかるため FA 分野で用いるためには高速ではない。終了した位置から開始位置に戻るまでの時間は 200ms で移動量は 0.48mm であり、移動時間に移動量は比例していないことがわかる。これは、移動量が小さい場合のほとんどは加減速している時間であり、速度は最大に達していないためである。移動させながらエンコーダーの位置情報を用いて撮影のタイミングを取得して格子画像を撮影する方法を用いることで、高速化することができる。その場合の位相シフトにかかる時間は、移動終了位置から開始位置に戻るまでの時間と同じなので 200ms であるといえる。そうすることで、FA 分野の比較的高速ではない用途に用いることが可能である。

次に、DMD による投影装置の位相シフト速度の評価を行うために、FA 分野で用いることができるような小型・軽量なものを選択して三次元計測装置の構築を行った。まず、その装置を用いて平面試料の計測を行った。その結果、 36mm の計測レンジに対して、計測誤差 0.024mm 、標準偏差 0.206mm と精度よく計測ができる結果を得た。しかし、この投影装置を用いて濃淡階調の格子を投影する場合の位相シフトの速度は 120Hz 程度になる。FA 分野で用いるには十分高速ではない。また、この投影装置は DMD の画素の隙間が投影されているため、今後さらに高精度化を行う際の問題になる。

従来の格子投影装置と本研究で開発した格子投影装置とサンプリングモアレカメラの比較表を表 7.2 に示す。サンプリングモアレカメラは、撮影範囲を最小にすることで 100kfps の速度で動作することができる。ここでは比較のため、最少 3 枚の格子画像があれば位相を求めることが可能なことから 100kfps 中に 3 回位相シフトを行っているとすると 300kHz の位相シフト速度になる。この結果より、従来の格子投影手法と比較して、本研究で開発した装置は高速であるといえる。

表 7.2 本研究で開発した格子投影装置と従来の投影装置の比較

装置名	位相シフト の速度 [Hz]	寸法 [mm]	重さ [g]
レーザー変調格子投影装置	200	67×65×30	300
複数ライン LED 格子投影装置	200k	55×59×65	240
複数光路格子投影装置	600k	70×70×35	170
サンプリングモアレカメラ	300k	86×44×128	720
超音波モーターを用いた 格子投影装置	10	52×45×58	200
DMD を用いた 投影装置	120	65×117×23	160

8. まとめ

8-1 本研究のまとめ

本研究では、位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測の高速化を行うため、格子投影装置とサンプリングモアレカメラの開発を行った。

格子投影装置は、高速に格子の位相をシフトすることが可能な3種類の手法を用いて、FAで用いることができるように小型・軽量の格子投影装置の開発を行った。

一つ目は、レーザー変調格子投影装置の開発を行った。まず、本研究では、深さの広い格子投影が可能な特徴を活用できるように、2種類の異なるピッチの格子を投影することができる格子投影装置を試作し、計測範囲を80mmまで拡大をした三次元計測装置の開発を行った。本装置と産業用ロボットを組み合わせたシステムを構築してビンピッキングへの適用を行うことで、本投影装置の有効性の確認をすることができた。約0.14sで2種類の異なるピッチの格子画像を取得することができるため、ビンピッキングの用途では十分高速であるといえる。次に、本投影装置の格子のピッチは全投影領域で一定でないため、格子のピッチが一定でなくても精度のよい計測を行えるように、全空間テーブル化手法をキャリブレーションに適用した。その結果、50mmの計測範囲において標準偏差0.112mm、誤差0.004mmで高精度に計測することができた。さらに、温度によって格子ピッチが変化する問題に対して、格子ピッチが変化しないように補正する手法について提案を行い、実験装置により補正が正しく行われていること確認した。その補正手法を用いた小型で軽量の格子投影装置を開発した。寸法は67mm×65mm×30mmで重さは300gである。FA分野で用いるために十分小型・軽量である。しかし、補正に用いるセンサーの応答性能がネックとなり、走査周波数200Hzの共振型スキャナを用いている。そのため、用途によっては、位相シフト速度は十分高速ではない。この課題は、応答性能のよいセンサーを用いることで解決することが可能である。

二つ目は、複数ラインLED格子投影装置の開発を行った。先行研究では、点光源のLEDや汎用基板を用いて製作したラインLEDを用いたため十分性能を評価することができなかった。そのため、本研究では、実用化のために専用設計した2種類の複数ラインLEDデバイスの開発を行った。一つ目は、高密度複数ラインLEDデバイスの開発を行い、そのデバイスを用いた高密度複数ラインLED格子投影装置の試作を行った。本格子投影装置の寸法は55mm×59mm×65mmで、重さは240gである。本格子投影装置を用いた三次元計測装置を構築して、精度の確認を行った。その結果、高さ計測範囲8mmに対して平均誤差0.005mm以下、標準偏差0.013mm以下で精度よく計測することができた。また、この投影装置の位相シフト機構の応答速度を調査した。その結果、200kHzの速度で位相シフトを行うことができた。二つ目は、高密度複数ラインLEDデバイスから光量不足を解決するため、高輝度なLED素子を用いて高輝度複数ラインLEDデバイスの開発を行った。本デバイスを用いて高輝度複数ラインLED格子投影装置を開発した。本格子投影装置の寸法は77mm×92mm×

69mm で、重さは 450g である。本格子投影装置を用いて、精度検証のために平面試料を用いて精度の検証を行った。その結果、高さ計測範囲 25mm に対して平均誤差 0.003mm 以下、標準偏差 0.033mm 以下の高精度に計測をすることができた。高密度複数ライン LED 格子投影装置と比較すると、高輝度複数ライン LED 格子投影装置は標準偏差の値が大きいが、これは、ライン LED 間のピッチが高輝度複数ライン LED デバイスのほうが大きいので投影する格子のピッチも大きく計測範囲が広いためである。標準偏差を計測範囲で割った単位計測範囲あたりの標準偏差では、高密度複数ライン LED 格子投影装置は 0.0016 mm/mm で、高輝度複数ライン LED 格子投影装置は 0.0013mm/mm であり、同等の精度であるといえる。高密度複数ライン LED 格子投影装置は、計測精度が必要な用途で、高輝度複数ライン LED 格子投影装置は、高さ方向に大きい計測範囲が必要な用途で用いることが可能である。また、対象物を移動させながら三次元計測を行った。高密度複数ライン LED 格子投影装置では 80fps のリアルタイムで、高輝度複数ライン LED 格子投影装置では 280fps のリアルタイムで三次元計測を行うことができた。高輝度複数ライン LED デバイスは、高密度複数ライン LED デバイスより光量が高いためカメラの露光時間を短くすることができる。そのため、より高速に三次元計測を行うことができています。使用したカメラのフレームレートがネックとなり、ベルトコンベア上を停止することなく移動している対象物の検査の用途で要求されている 1ms の速度で三次元計測を行うことはできなかった。しかし、位相シフトは 200kHz で行うことができるため、高速度カメラを撮影に用いることで高速化することができる。高密度複数ライン LED デバイスを用いた格子投影装置と高速度カメラを組み合わせ、12kHz の速度で位相シフトを行い、4kfps の計測を実現した報告がなされている。これらにより、本格子投影装置を用いることで、ベルトコンベア上を停止することなく移動している対象物の検査など、対象物を停止させることが困難な用途に対して要求されている高速な三次元計測を行うことが可能となる。

三つ目は、複数光路格子投影装置の開発を行った。まず、本研究では、新たな格子投影手法として、複数光路格子投影手法の提案を行った。また、本手法を用いた格子投影装置の開発を行った。本格子投影装置の寸法は 70mm×70mm×35mm で、重さは 170g であるため、FA 分野に用いるために十分小型・軽量である。次に、本格子投影装置を用いて位相シフト機構の応答速度の評価を行った。その結果、600kHz の速度で位相シフトが可能であることを確認した。また、三次元計測装置を構築し、精度を検証した結果、高さ計測範囲 11mm に対して、計測誤差 0.023mm、標準偏差 0.038mm で精度よく計測することができた。さらに、本格子投影装置と高速度カメラを用いて三次元計測装置を構築し、ミルククラウンと回転するファンの三次元計測を行った。ミルククラウンの場合は、15kHz で位相シフトを行い 5kHz で三次元計測を行った。回転するファンの場合は、30kHz で位相シフトを行い 10kHz で三次元計測を行った。その結果、動的物体の三次元計測を行うことが可能であることを示すことができた。液体など形状の変化が高速な対象物にも用いることが可能であるといえる。また、本投影手法は、面発光の LED を用いることができるため、比較的簡単に光量

をあげることができる．そのため，さらに高速な用途の三次元計測にも本格格子投影手法を用いることが可能である．

次に，サンプリングモアレカメラの開発を行った．FA 分野で用いることができるように高速化と小型・軽量化されたサンプリングモアレカメラを開発した．その寸法は $86\text{mm} \times 44\text{mm} \times 128\text{mm}$ で，重さは 720g である．また，サンプリングモアレカメラからの出力されるモアレの位相分布から高さ分布への変換を高速にするため，全空間テーブル化手法を適用した．モアレの位相を用いて全空間テーブル化手法のテーブルを作成することで，モアレの位相分布を投影格子の位相分布に変換する必要がなくなる．そのため，高速に処理が可能である．また，本カメラを用いた三次元計測の精度検証を行った結果，高さ計測範囲 9mm に対して，計測誤差 0.008mm ，標準偏差 0.004mm で計測することができた．さらに，厚紙に定在波を発生させて約 434fps のリアルタイムで三次元計測を実現し，高速に三次元計測ができることの確認を行った．FA 分野において，リアルタイムで三次元計測を行いたい用途にサンプリングモアレカメラを適用することが可能である．

表 8-1 に，本研究で開発した装置の仕様と特長をまとめる．

位相シフトの速度について述べる．複数ライン LED 格子投影装置と複数光路格子投影装置は，LED の切替による位相シフト機構を持っている．そのため，両方の装置とも位相シフトの高速化の限界は LED の応答性能である．しかし，本研究で開発した格子投影装置の位相シフトの速度には差がある．これは，LED を駆動するドライバーの性能の差である．ドライバーの駆動性能があがれば，一般的な LED の応答速度である $10\text{MHz} \sim 20\text{MHz}$ の位相シフトが可能となる．レーザー変調格子投影装置は，一次元共振型スキャナの走査周波数で位相シフトすることができる．高速なものでは 8kHz の走査が可能である．そのため，今後，補正の性能が上がれば， 8kHz で位相シフトを行うことが可能となる．サンプリングモアレカメラは，撮影範囲を最小にすることで 100kfps の速度で動作することができる．最少 3 枚の格子画像があれば位相を求めることが可能なことから 100kfps 中に 3 回位相シフトを行っているとする 300kHz の位相シフト速度になる．

寸法と重さにおいては，それぞれの装置で FA 分野で用いることが可能なように十分小型・軽量化がされているといえる．

精度においては，各装置で計測範囲が異なるため，単位計測範囲あたりの精度で比較すると，サンプリングモアレカメラが高精度である．これは，近傍の複数画素の輝度値を用いて位相シフトされたモアレ画像を生成するため，位相が平滑化されるからである．しかし，格子投影装置の位相シフト機構を用いた三次元計測と比較すると空間分解能は悪い．本研究で開発した格子投影装置の位相シフト機構を用いた三次元計測の精度も，計測範囲を 1mm とした場合， $1\mu\text{m}$ オーダーの精度で三次元計測を行うことが可能であり，十分高精度といえる．

光量は高いほど，格子の輝度振幅の高い画像が取得できるため，精度のよい計測ができる．高速に位相シフトされた格子画像を取得する場合，その速度に伴いカメラの露光時間

が短くなるため、取得した格子画像の輝度振幅は低くなる。そのため、投影装置の光量を大きくする必要がある。レーザー変調格子投影装置や複数ライン LED 格子投影装置は、面状の光源を用いることができないため光量をあげることが困難である。しかし、複数光路格子投影装置は、面発光の LED など、面状の光源をもちることが可能なため光量を大きくすることが簡単に可能である。

投影格子の高さ方向の広さは、結像レンズを用いた投影ではレンズの被写界深度によって決まる。レンズのピントの合っている範囲外では、格子の輝度振幅が低くなる。レーザー変調格子投影装置や複数ライン LED 格子投影装置は、投影に結像レンズを用いていないため高さ方向の広い投影が可能である。そのため、高さ方向に広い範囲で精度よく計測することができる。サンプリングモアレカメラでは、静止した格子を投影できればよいので、レーザー変調格子投影装置や複数ライン LED 格子投影装置を用いることで高さ方向の広い投影が可能であるといえる。

計測範囲の拡大について述べる。レーザー変調格子投影装置は、格子のピッチを電氣的に変えることが可能なため、2 種類の異なるピッチの格子を用いて位相接続を行うことにより、精度を保ったまま計測範囲を拡大することができる。サンプリングモアレカメラも二次元格子を投影することで、二方向の位相分布を得ることができる。高さによって変化量の異なる位相分布が得られるようなレイアウトにしておくことで、高さ方向の計測範囲を広げることができる。

表 8.1 から各装置には一長一短あるため優劣を決めることはできない。三次元計測を用いる用途に応じて、最適な装置を選択することで、それぞれの装置の利点を活かせるようになる。

本研究により、高速で小型・軽量の 3 種類に格子投影装置とサンプリングモアレカメラ開発を行った。格子投影装置は、最高 600kHz で位相シフトを行うことができた。サンプリングモアレカメラは、最高 100kfps のリアルタイムで三次元計測を行うことができる。これらの装置を用いることで、位相シフトされた格子画像の取得を高速に行うことができる。そのため、FA 分野で位相シフト法を用いた格子投影型三次元計測を用いることができるようになり、生産性の向上、コスト削減、品質向上がされると考えられる。

表 8.1 開発した装置のまとめ

	位相シフト の速度 [Hz]	寸法 [mm]	重さ [g]	精度/ 計測範囲 [mm/mm]	光量	空間 分解能	投影格子 の高さ方 向の広さ	計測 範囲 の拡大
レーザー変調 格子投影装置	200	67×65×30	300	0.0022 (0.112/50)	×	○	○	○
複数ライン LED 格子投影装置	200k	55×59×65	240	0.0013 (0.033/25)	×	○	○	×
複数光路 格子投影装置	600k	70×70×35	170	0.0035 (0.038/11)	○	○	×	×
サンプリング モアレカメラ	300k (100kfps)	86×44×128	720	0.0009 (0.008/9)	○	×	○	○

8-2 今後の課題と発展

本研究によって明らかになったことを踏まえて、以下に今後の課題を示す。

格子投影装置の高速化においては、高速になるほど撮影装置の露光時間は短くなるため、輝度振幅の高い格子画像の取得が難しくなる。輝度振幅の高さは計測精度に影響を与えるため、投影光をレンズなどで集光させたり、光源の駆動回路の性能を高めたりすることで、投影格子の光量を上げる必要がある。また、温度や経年劣化による光源の光量変化も計測精度に影響を与える。この課題に対しては、フォトダイオードなどで光量を計測して一定にするようにフィードバック方法を用いることで解決をしていく。小型・軽量化においては、専用のデバイスやレンズを製作することで、さらなる小型・軽量化が期待できる。

サンプリングモアレカメラの高速化においては、処理結果の転送時間が高速化のネックになっている。これは、年々進化する高速なインターフェースによって解決される。精度においては、本研究では一次元格子を用いたが、二次元格子を用いることで二方向の位相分布を求めることができる。情報量を増やすことができるため、高精度化することができる。小型・軽量化においては、プリント基板を複数に分割して段積みすることで、さらに小型化が可能である。それに合わせて筐体も設計しなおすことで軽量化も可能である。

三次元計測装置として高速化や高精度化を考えると撮影装置と格子投影装置、処理装置の連携も重要である。例えば、高速化では、格子投影装置と撮影の同期性能、撮影装置のシャッタースピードや処理装置までの画像の転送時間が関係する。高精度化では、格子投影装置だけでなく撮影装置のノイズも計測精度に影響をあたえる。三次元計測装置を構成している格子投影装置や撮影装置、処理装置の性能をバランスよく上げていく必要がある。

FA 分野で実用化するためには、装置に用いる部品の入手性や長期供給可能であるかなども重要である。特に、特許などの関係で 1 社からしか供給がされない特殊な部品を装置のキーデバイスとして用いることは、その部品の入手が困難になった場合に装置の供給ができなくなる。汎用的な部品だけで構成される装置の開発も重要である。

将来は、本研究で開発した投影装置や撮影装置を用いて、高速・高精度三次元形状計測装置の実用化に取り組んで行く。

参考文献

- [1] Chen, F., Brown, G. M. and Song, M., “Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods”, *Optical Engineering*, 39-1, 10-22 (2000).
- [2] 吉澤徹, “光三次元計測(三次元工学 1)”, 新技術コミュニケーション (1993).
- [3] 井口征士, 佐藤宏介, “三次元画像計測”, 昭晃堂, (1990).
- [4] Nayar, S. K., “Shape from Focus System”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 302-308 (1992).
- [5] 石原満広, 佐々木博美, “合焦法による高速三次元形状計測”, *精密工学会誌*, 63-1, 124-128 (1997).
- [6] Subbarao, M. and Surya, G., “Depth from Defocus: A Spatial Domain Approach”, *International Journal of Computer Vision*, 13-3, 271-294 (1994).
- [7] 松山隆司, 竹村岳, “多重フォーカス画像を用いた実時間 3 次元距離計測”, *情報処理学会論文誌*, 39-7, 2149-2158(1998).
- [8] 徐剛, 辻三郎, “3 次元ビジョン”, 共立出版, (1998).
- [9] Massa, J. S., Buller, G. S., Walker, A. C., Cova, S., Umasuthan, M. and Wallace, A. M., “Time-of-flight Optical Ranging System based on Time-correlated Single-photon Counting”, *Applied Optics*, 37-31, 7298-7304 (1998).
- [10] Oggier T., Lehmann T., Kaufmann R., Schweizer M., Richter M., Metzler P., Lang G., Lustenberger F., and Blanc N. “An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (Swiss Ranger)”, *Proc. SPIE*, 5249, 634-545 (2003).
- [11] 小関修, 中野倫明, 山本新, “光切断法を用いた実時間距離検出装置”, *電子通信学会論文誌*, J68-D-5, 1141-1148 (1985)
- [12] Saint-Mark, P., Jezouin, J. and Medioni, G., “A versatile PC-based range finding system“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7-2, 250-256 (1991).
- [13] 荒木和男, 田中伸宜, 藤野智浩, 佐藤幸男, “高速 3 次元形状計測装置の試作”, *電子通信学会論文誌*, J71-D-10, 2059-2068 (1988).
- [14] 佐藤宏介, “シリコンレンジファインダ”, *日本ロボット学会誌*, 13-3, 315-318 (1986).
- [15] 佐藤宏介, 井口征士, “空間コード化による距離画像入力”, *電子通信学会論文誌*, J68-D-3, 369-375 (1985)
- [16] Müller, E., “Fast three-dimensional form measurement system”, *Optical Engineering*, 34-9, 2754-2756 (1995).
- [17] Sansoni, G., Corini, S., Lazzari, R. and Docchio, F., “Three-dimensional imaging based on Gray-code light projection: characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial applications”, *Applied Optics*, 36-19, 4463-4472 (1997).
- [18] Valkenburg, R. J. and Mcivor, A. M., “Accurate 3D measurement using a structured light system”, *Proc. SPIE*, 2909, 68-80 (1997).

- [19] 土居謙介, 辻徳生, 山本健吉, 石井抱, “高フレームレート三次元画像計測のためのコード化パターン光投影法”, 電子通信学会論文誌, J91-D-5, 1359-1368 (2008).
- [20] Blos, R, “Accordion fringe interferometry: a revolutionary new digital shape-scanning technology”, Sens Rev, 28-1, 22-26 (2008).
- [21] 小松原良平, 吉澤徹, “縞走査を導入した格子パターン投影法”, 精密工学会誌, 55-10, 1817-1822, (1989)
- [22] Yamatani, K., Fujita, H., Yamamoto, M., Suguro, A., Otani, Y., Morokawa, S. and Yoshizawa, T., “Three-dimensional surface profilometry using structured liquid crystal grating”, Proc. SPIE, 3782, 291-296 (1999).
- [23] Zhang, S., Weide, D. V. D. and Oliver, J., “Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement”, Optics Express, 18-9, 9684-9689 (2010).
- [24] Park, Y. C., Ahn, S. J., Kang, M. H., Kwon, Y. C. and Ahn, S. J., “Ultra High-speed 3-dimensional Profilometry Using a Laser Grating Projection System”, Journal of the Optical Society of Korea, 13-4, 464-467 (2009).
- [25] Wakayama, T. and Yoshizawa, T., “Compact camera for three-dimensional Profilometry Incorporating a Single MEMS mirror”, Optical Engineering, 51-1, 013601 (2012)
- [26] Morimoto, Y., Fujigaki, M., Masaya, A. and Amino, Y., “Shape Measurement by Whole-space Tabulation Method Using Phase-shifting LED Projector”, International Conference on Advanced Phase Measurement Methods in Optics and Imaging, 1236, 377-382(2010).
- [27] Morimoto, Y., Fujigaki, M., Masaya, A. and Y., Oura, “Shape Measurement by Light-stepping Method Using LEDs”, ISOT 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 1-6, (2010).
- [28] 榎谷明大, 藤垣元治, 森本吉春, “全空間テーブル化手法を適用した光源切替位相シフト法による三次元形状計測の提案”, 精密工学会, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, L08, 749-750 (2010).
- [29] 森本吉春, 榎谷明大, 藤垣元治, 浅井大介, “多数のライン LED 光源を用いた格子投影法による形状計測”, ViEW2011 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演概要集, 14-15, (2011)
- [30] Morimoto, Y., Masaya, A., Fujigaki, M. and Asai, D., “High-speed, High-accuracy and Low Cost Shape Measurement System Using Phase Analysis of Grating Projected by Multi Line LED Light Sources”, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, 7-17, (2012). 【Keynote Paper】
- [31] Fujigaki, M., Yokoyama, T., Oura, Y., Sakaguchi, T., Asai, D. and Murata, Y., “Characteristic Evaluation of Linear LED Grating Projector for High-speed Shape Measurement”, Proc. SPIE, International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013), 87691J, 1-6 (2013). 【Invited Paper】
- [32] Fujigaki, M., Oura, Y., Asai, D. and Murata, Y., “High-speed Height Measurement by a Light-source-stepping Method Using a Linear LED Array”, Optics Express, 21-20, 23169-23180 (2013).

- [33] 藤垣元治, “サンプリングモアレ法を用いた構造物の変位分布計測”, 応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会, (2008).
- [34] Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, *Experimental Mechanics*”, 50-4, 501-508 (2010).
- [35] 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大, “サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測”, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, 54-1, 32-38 (2011).
- [36] Fujigaki, M., Sasatani, Y., Masaya, A., Kondo, H., Nakabo, M., Hara, T., Morimoto, Y., Asai, D., Miyagi, T. and Kurokawa, N., “Development of Sampling Moire Camera for Real-time Phase Analysis”, *Applied Mechanics and Materials*, 83, 48-53 (2011)
- [37] Kakunai, S., Sakamoto, T. and Iwata, K., “Profile Measurement Taken with Liquid-crystal Grating”, *Applied Optics*, 38-13, 2824–2828 (1999).
- [38] Reich, C., Ritter, R. and Thesing, J., “3-D Shape Measurement of Complex Objects by Combining Photogrammetry and Fringe Projection”, *Optical Engineering*, 39-1, 224–231 (2000).
- [39] Takeda, M. and Mutoh, K., “Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes”, *Applied Optics*, 22-24, 3977–3982 (1983).
- [40] Saldner, H. O. and Huntley, J. M., “Profilometry Using Temporal Phase Unwrapping and a Spatial Light Modulator-based Fringe Projector”, *Optical Engineering*, 36-2, 610–615 (1997).
- [41] Asundi, A. and Zhou, W., “Unified Calibration Technique and Its Applications in Optical Triangular Profilometry”, *Applied Optics*, 38-16, 3556–3561 (1999).
- [42] Habib, A. F. and Morgan, M. F., “Automatic Calibration of Low-cost Digital Cameras”, *Optical Engineering*, 42-4, 948–955 (2003).
- [43] Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M., “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14-10, 965–980 (1992).
- [44] Wei, G. and Ma, S., “Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16-5, 469–480 (1994).
- [45] Takahashi, A., Ishii, I., Makino, H. and Nakashizuka, M., “A Camera Calibration Method Using Parallelogramatic Grid Points”, *IEICE Transactions on Information and Systems*, E79-D-11, 1579–1587 (1996).
- [46] 藤垣元治, 森本吉春, “フーリエ変換位相シフト法を用いたレンズ収差の影響のない高精度非接触形状計測”, 日本非破壊検査協会平成 8 年度春季大会講演概要集, 141-144 (1996).
- [47] Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Shape Measurement by Grid Projection Method without Influence of Aberration of Lenses”, *Post Conference Proc. of the VIII International Congress on Experimental Mechanics, SEM*, 167–172 (1996).
- [48] 藤垣元治, “高精度高速形状変形計測法の研究”, 博士論文, (2001).
- [49] 藤垣元治, 森本吉春, “全空間テーブル化手法による格子投影三次元形状計測”, *実験力学*, 8-4, 92-98(2008).

- [50] Fujigaki, M., Inoue, H. and Morimoto, Y., "Application of Gabor Transform to 3-D Shape Analysis Using Grating Pattern Projection Method", *Proc. ATEM'95, JSME*, 67–72 (1995).
- [51] Arai, Y., Yokozeki, S., Shiraki, K., and Yamada, T., "High Precision Two-dimensional Spatial Fringe Analysis Method", *Journal of Modern Optics*, 44-4, 739-751(1997).
- [52] Wyant, J. C., Koliopoulos, C. L., Bhushan, B. and George, O. E., "An Optical Profilometry for Surface Characterization of Magnetic Media", *ASLE Trans.*, 27, 101–113 (1983).
- [53] de Groot, P., "Derivation of Algorithms for Phase-shifting Interferometry using the Concept of a Data-sampling Window", *Applied Optics*, 34-22, 4723–4730 (1995).
- [54] Hariharan, P., "Phase-shifting Interferometry: Minimization of Systematic Errors", *Optical Engineering*, 39-4, 967–969 (2000).
- [55] Hariharan, P., Oreb, B. F. and Eiju, T., "Digital Phase-shifting Interferometry: a Simple Error-compensating Phase Calculation Algorithm", *Applied Optics*, 26-13, 2504-2506 (1987).
- [56] Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Toda, H., "Real-time Shape Measurement by Integrated Phase-Shifting Method", *Proc. SPIE*, 3744, 118–125 (1999).
- [57] Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Yabe, M., "Real-Time Measurement of Nanometer Displacement Distribution by Integrated Phase-Shifting Method", *JSME International Journal (Series A)*, 45-3, 448–452 (2002).
- [58] Bruning, J. H., Herriott, D. R., Gallagher, J. E., Rosenfeld, D. P., White, A. D. and Brangaccio, D. J., "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses", *Applied Optics*, 13-11, 2693–2703 (1974).
- [59] 武田光夫, "サブフリンジ干渉計測基礎論", *光学*, 13-1, 55–65 (1984).
- [60] Morimoto, Y. and Fujisawa, M., "Fringe Pattern Analysis by a Phase-shifting Method using Fourier Transform", *Optical Engineering*, 33-11, 224–231 (1994).
- [61] Huntley, J. M. and Coggrave, C. R., "Progress in Phase Unwrapping", *Proc. SPIE*, 3407, 86–93, (1998).
- [62] Herraiez, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J. and Gdeisat, M. A., "Fast Two-dimensional Phase-unwrapping Algorithm based on Sorting by Reliability Following a Non Continuous Path", *Applied Optics*, 41-35, 7437–7444 (2002).
- [63] Herraiez, M. A., Gdeisat, M. A., Burton, D. R. and Lalor, M. J., "Robust, Fast, and Effective Two-dimensional Automatic Phase Unwrapping Algorithm based on Image Decomposition", *Applied Optics*, 41-35, 7445–7455 (2002).
- [64] Zhang, S., Li, X. and Yau, S., "Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction", *Applied Optics*, 46-1, 50–57 (2007).
- [65] Huntley, J. M. and Saldner, H., "Temporal Phase-unwrapping Algorithm for Automated Interferogram Analysis", *Applied Optics*, 32-17, 3047–3052 (1993).
- [66] Saldner, H. O. and Huntley, J. M., "Profilometry Using Temporal Phase Unwrapping and a Spatial Light Modulator-based Fringe Projector", *Optical Engineering*, 36-2, 610–615 (1997).

- [67] Saldner, H. O. and Huntley, J. M., “Temporal Phase unwrapping: Application to Surface Profiling of Discontinuous Objects”, *Applied Optics*, 36-13, 2770–2775 (1997).
- [68] 格内敏・中本邦博・坂本亨・岩田耕一, “プロジェクタを用いた三次元形状計測”, *精密工学会誌*, 62-11, 1592–1596 (1996).
- [69] Gushov, V. I. and Solodkin, Y. N., “Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers”, *Optics and Lasers in Engineering*, 14, 311–324 (1991).
- [70] 塚本勝男, “リアルタイム位相シフト干渉法を用いた溶液成長界面の動的観察”, *応用物理*, 63-7, 713-716 (1994).

研究業績

A. 学会誌掲載論文・ジャーナル論文

- (1) Asai, D., Miyagi, T., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Application to Bin-picking of Shape Measurement Using Whole-space Tabulation Method with MEMS Scanner Grating Projector, Journal of JSEM, Vol. 10, Special Issue, pp. 186-191, (2010).
- (2) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 森本吉春, MEMS スキャナ格子投影装置を用いた形状計測の位相接続による計測範囲の拡大, 実験力学, Vol. 10, No. 1, pp. 74-81, (2010).
- (3) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 高速形状計測のための複数光路格子投影装置の開発, 精密工学会誌, Vol. 80, No. 3, pp. 316-321, (2014).
- (4) Fujigaki, M., Sasatani, Y., Masaya, A., Kondo, H., Nakabo, M., Hara, T., Morimoto, Y., Asai, D., Miyagi, T., Kurokawa, N., Development of Sampling Moire Camera for Real-time Phase Analysis, Applied Mechanics and Materials, Vol. 83, pp. 48-53, (2011).
- (5) Fujigaki, M., Oura, Y., Asai, D. and Murata, Y., High-speed Height Measurement by a Light-source-stepping Method Using a Linear LED Array, Optics Express, Vol. 21, No. 20, pp. 23169-23180, (2013).

B. 国際会議

- (1) Asai, D., Miyagi, T., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Application to Bin-picking of 3D Shape Measurement Using Whole-space Tabulation Method with MEMS Scanner Grating Projector, Proceeding of the International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics (4th ISEM '09-NIIGATA), O-III-3, (2009).
- (2) Fujigaki, M., Masaya, A., Kondo H., Hara T., Asai D. and Morimoto Y., Accuracy of Real-time Deformation Measurement Using Sampling Moire Camera, Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM'11), OS01-3-2, (2011).
- (3) Morimoto, Y., Masaya, A., Fujigaki, M. and Asai, D., High-speed, High-accuracy and Low Cost Shape Measurement System Using Phase Analysis of Grating Projected by Multi Line LED Light Sources, Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics, pp. 7-17, (2012). 【Keynote Paper】
- (4) Fujigaki, M., Yokoyama, T., Oura, Y., Sakaguchi, T., Asai, D. and Murata, Y., Characteristic Evaluation of Linear LED Grating Projector for High-speed Shape Measurement, Proc. SPIE 8769, International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013), pp. 87691J-1-6, (2013). 【Invited Paper】

C. 特許

- (1) 藤垣元治, 浅井大介, 複数の格子を用いた三次元形状計測装置, 特願 2012-42391, 出願日: 2012年2月28日
- (2) 宮城貞二, 浅井大介, 光投影装置, 特願: 2013-76158, 出願日: 2013年4月1日

D. 著書

- (1) Morimoto, Y., Masaya, A., Fujigaki, M. and Asai, D., Shape Measurement by Phase-Stepping Method Using Multi-Line LEDs, Applied Measurement Systems (Ed. Md. Zahurul Haq), InTech (Rijeka, Croatia), Chapter 7, pp.137-152, (2012).

E. 国内会議

- (1) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 森本吉春, レーザー変調格子投影装置を用いた 3 次元形状計測装置のビンピッキングへの適用, 日本実験力学学会講演論文集, No. 8, pp. 128-133, (2008).
- (2) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 森本吉春, MEMS スキャナを用いた 3 次元形状計測用の投影装置の開発, 第 13 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, pp. 192-197, (2008).
- (3) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 森本吉春, 3 次元形状計測で用いるレーザー変調格子投影装置の補正方法の提案, 第 14 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, pp. 7-12, (2009).
- (4) 原卓也, 藤垣元治, 近藤寛之, 浅井大介, サンプリングモアレカメラによる構造物のリアルタイム変位分布計測, 社団法人日本非破壊検査協会平成 23 年度春季講演大会, pp. 125-128, (2011).
- (5) 塩川貴之, 藤垣元治, 浅井大介, 複数方向の格子を用いた三次元形状計測における計測可能な範囲の拡張, 日本実験力学学会講演論文集, No. 11, pp. 389-394, (2011).
- (6) 森本吉春, 梶谷明大, 藤垣元治, 浅井大介, 多数のライン LED 光源を用いた格子投影法による形状計測, ViEW2011 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演概要集, pp. 14-15, (2011).
- (7) 藤垣 元治, 塩川貴之, 原 卓也, 浅井大介, 村田頼信, 格子画像の位相解析ができるサンプリングモアレカメラの開発とリアルタイム三次元形状計測への適用, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 36, No. 43, pp. 21-24, (2012).
- (8) 浅井大介, 三次元計測で用いる光ハンドリングデバイス, 光応用技術シンポジウム Senspec2013 資料集, pp. 53-62, (2013).
- (9) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 液面を基準面とした複数光路格子投影装置を用いた高速高精度三次元形状計測, 第 18 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, pp. 162-167, (2013).
- (10) 浅井大介, 宮城貞二, 藤垣元治, 全空間テーブル化手法を用いた複数光路格子投影装置の格子位置ずれのキャリブレーション～高速かつ高精度な三次元計測装置の開発～, ViEW2013 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演概要集, pp. 22-23, (2013).

謝辞

本論文をまとめるにあたり，論文審査委員として懇切なる御指導と貴重な御意見を賜りました和歌山大学の和田俊和教授，松本正行教授，藤垣元治准教授，NPO 法人三次元工学会理事長の吉澤徹先生（東京農工大学名誉教授）に心から深く感謝の意を表します。

本研究は，株式会社ヒカリに在籍している筆者が社会人学生として和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程知的計測クラスタに入学してからの 3 年間，そして単位取得満期退学後の 3 年間の計 6 年間に藤垣元治准教授の御指導の下に行いました。藤垣元治准教授には，寛大な御指導で研究に関して大いに御教示を賜ったのみならず，論文投稿や国内・国際会議での学会発表など多くの機会を与えて頂きました。また，その都度，論文原稿や発表資料作成について多くの御助言と御支援を賜りました。さらに，本研究を通じて，藤垣元治准教授のアイデアが盛り込まれた多くの実験装置の開発にも携わらせて頂き，とても貴重な経験を積ませて頂きました。終わりに臨み，終始懇切丁寧なる御指導を賜りました藤垣元治准教授に重ねて感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり，有益な御助言，御示唆を賜りました 4D センサー株式会社代表取締役会長の森本吉春先生（和歌山大学名誉教授）ならびに村田頼信准教授に深く御礼申し上げます。また，平素の研究活動に関し，種々の御協力を頂いた和歌山大学波動エレクトロニクス研究室（旧光波画像計測研究室）の修了生・卒業生・在学生および関係者の皆様方に心より御礼申し上げます。修了生である小浦洋平氏（現日立造船株式会社社員）には，特に多くの御協力を頂きました。心より感謝いたします。

本研究の一部は，平成 22 年度兵庫県 COE プログラム推進事業を受けて行いました。共同研究者ならびに関係者の皆様に深く感謝いたします。

本研究遂行にあたり，社会人学生として和歌山大学への入学に御理解と御支援を頂きました株式会社ヒカリに感謝いたします。また，入学当初から多くの御助言と研究を進めるための環境の整備などの御支援を賜りました研究開発室のよき上司である宮城貞二氏をはじめ，様々な装置のハードウェアの製作に御協力を頂きました深谷真二氏，本論文の添削を御引き受け下さいました竹葉誠氏と菅倫明氏，FPGA の設計に御協力を頂きました黒川登氏，実験に御協力を頂きました井上寛之氏に感謝します。本論文の執筆は極めて長く，陰しいものでしたが，株式会社ヒカリの多くの仲間の存在は大きな支えとなりました。論文執筆と業務との両立の中で多くの御迷惑をおかけしましたが，多大なるサポートのお蔭により，本論文の完成を迎えることができました。ここに深く感謝申し上げます。

以上のように，本論文は，浅学菲才な筆者が多くの方々の御指導，御協力，御支援を得て完成できたものであります。重ねて御礼申し上げます。

最後になりましたが，日々やさしく支えてくれました妻の浩子，かわいく応援してくれました長女の花音，長男の柊音，次男の杜音に心から感謝いたします。

2014 年 3 月 浅井大介